INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



ECLIPSES HISTORICOS

Diciembre 1982

300 PTAS.

Copyright © 1982 Prensa Científica S.A.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 75
Diciembre 1982

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

SCIENTIFIC AMERICAN

COMITE DE REDACCION: Gerard Piel (Presidente), Dennis Flanagan, Brian P. Hayes, Philip Morrison, Francis Bello, Peter G. Brown, Michael Feirtag, Jonathan B. Piel, John Purcell, James T. Rogers, Armand Schwab, Jr., Joseph Wisnovsky

DIRECCION EDITORIAL: Dennis Flanagan
DIRECCION ARTISTICA: Samuel L. Howard
PRODUCCION: Richard Sasso
DIRECTOR GENERAL: George S. Conn

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR: Francisco Gracia Guillén
REDACCION: José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe), Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION: César Redondo Zayas
VENTAS Y PUBLICIDAD: Elena Sánchez-Fabrés
PROMOCION EXTERIOR: Pedro Clotas Cierco
EDITA: Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

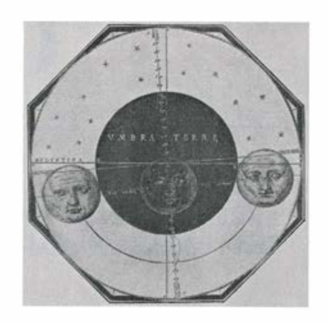
Antonio Travesí y J. Palomares: *Verificación de una prohibición absoluta de pruebas nucleares*; Cristóbal Mezquita: *Calcio y transmisión sináptica*; Luis Bou: *Inteligencia artificial*; J. L. Sebastián: *Fluidos magnéticos*; Montserrat Domingo: *Macareos de marea*; Javier Niell: *Así se funda una colmena*; Julio Samsó: *Eclipses históricos*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad

M. García Velarde y Luis Cornudella

Libros:

M. García Doncel, Miguel A. Quintanilla y Mercedes Durfort



LA PORTADA

La fotografía de la portada muestra una de las láminas, coloreadas a mano, de una obra célebre del siglo XVI debida al cosmólogo alemán Petrus Apianus, que se publicó en Ingolstadt en 1540. Su título es *Astronomicum Caesareum* ("Astronomía Imperial") y fue dedicada al Emperador Carlos V, del Sacro Imperio Romano-Germánico, y a su hermano y sucesor electo Fernando I. La obra fue ilustrada por el grabador Michael Ostendorfer. La lámina muestra tres etapas en el avance de la luna durante un eclipse total lunar: se trata de la fase de aproximación, de su entrada en la sombra de la tierra y de su salida de la misma (véase "Eclipses históricos", por F. Richard Stephenson, página 94). El grabador se ha tomado ciertas libertades artísticas para sugerir que el rostro de la luna se encuentra afligido debido a su paso por la oscuridad. El ejemplar del *Astronomicum Caesareum* del que se ha tomado esta ilustración se encuentra en el Museo Metropolitano de Arte, al que fue regalado, en 1925, por Herbert N. Straus.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 371

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.300 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
340 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
440 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º, Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

La fotografía de portada se publica por cortesía del Museo Metropolitano de Arte

Página	Fuente
11-14	Alan D. Iselin
15	Lynn R. Sykes
16-18	Alan D. Iselin
20-22	Tom Prentiss
23	David W. Pumplin, Facultad de Medicina de la Universidad de Maryland en Baltimore, y Thomas S. Reese, National Institute of Neurological and Communicative Disorders and Stroke
24	Ilil Arbel (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
25-26	Ilil Arbel
27	Ilil Arbel (*arriba*); David W. Pumplin, Facultad de Medicina de la Universidad de Maryland en Baltimore, y Thomas S. Reese, National Institute of Neurological and Communicative Disorders and Stroke (*abajo*)
28-29	Ilil Arbel
32	J. I. García de la Rosa, F. Herrera y M. Vázquez
34-37	Miguel Alonso, J. I. García de la Rosa, F. Herrera y M. Vázquez
38-39	C. J. Wolfson
40-41	Miguel Alonso, J. I. García de la Rosa, F. Herrera y M. Vázquez
42	R. Eather
49-60	Jerome Kuhl
63-65	Ronald E. Rosensweig
66-67	Gabor Kiss
68	Gabor Kiss (*arriba*), Ronald E. Rosensweig (*abajo*)
69-70	Gabor Kiss
73	Judith Tricker, cortesía de R. A. R. Tricker (*arriba*); David K. Lynch (*abajo*)
74	Susan Bartsch-Winkler (*arriba*); C. G. Kershaw, Severn-Trent Water Authority (*abajo*)
75-77	Andrew Tomko
78-82	Ian Worpole
85-86	Karl Hartig
87-88	Thomas D. Seeley
89	Patricia J. Wynne (*arriba*), Karl Hartig (*abajo*)
90-91	Karl Hartig
95	Owen Gingerich
96-97	Andrew Tomko
98	© Museo Británico
99	F. Richard Stephenson
100-101	Andrew Tomko
102-103	E. H. Strach
107	Letraset USA Inc.
117	Lorne A. Whitehead
118-122	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Copyright © 1982 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York. N. Y. 10017.
Copyright © 1982 Prensa Científica, S. A., Calabria, 235-239 - Barcelona-29 (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista.

El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo distintivo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

Los autores

LYNN R. SYKES y JACK F. EVERNDEN ("Verificación de una prohibición absoluta de pruebas nucleares") son geofísicos que han dedicado largas horas de su trabajo al estudio de los métodos que permiten distinguir entre explosiones nucleares y terremotos. Sykes ocupa la cátedra Higgins de geología de la Universidad de Columbia y dirige el grupo de investigación sismológica del observatorio de Lamont-Doherty. Comenzó su carrera en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, doctorándose en 1964 por la Universidad de Columbia. Centró su campo de atención en el dominio de las placas tectónicas, especializándose en la estructura de la placa de Asia, que puede convertirse en importante punto de apoyo para el seguimiento del tratado de una prohibición absoluta de cualquier prueba nuclear. Evernden ostenta la jefatura de programas del centro de investigación de seísmos, adscrito al Servicio Geológico de los Estados Unidos. Procede de la Universidad de California en Berkeley.

RODOLFO R. LLINAS ("Calcio y transmisión sináptica") es profesor y secretario del departamento de fisiología y biofísica del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York. Nacido en Colombia, se licenció, en 1959, por la Universidad Pontificia Javeriana. Se traslada entonces a Australia, donde se recibe de doctor, en 1965, por su Universidad Nacional. Ese año se instala en los Estados Unidos para enseñar en la de Minnesota. De 1966 a 1970 pertenece al Instituto de Investigación Biomédica, de la Fundación de Educación e Investigación de la Asociación Médica Americana. En 1970 se le nombra profesor de fisiología y biofísica y jefe de la división de neurobiología de la Universidad de Iowa; en 1976 deja Iowa y accede a sus cargos actuales en el mencionado centro superior neoyorquino. Llinás ha trabajado en la transmisión sináptica y en la evolución del sistema nervioso central.

J. I. GARCIA DE LA ROSA, F. HERRERA CABELLO y MANUEL VAZQUEZ ABELEDO. ("Las fulguraciones solares") son miembros de la sección solar del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). J. I. García de la Rosa se formó en la Universidad de Zaragoza; trabaja en el IAC desde 1979, después de haber obtenido el master de astrofísica en la Universidad de Sussex. Su campo de investigación es la evolución de regiones activas. F. Herrera Cabello, doctor en ciencias físicas y licenciado en ciencias químicas por la Universidad de La Laguna, ha colaborado, de 1958 a 1974, en los siguientes programas de la NASA: Vanguard, Mercury, Gemini, Apolo y Skylab, en el campo de técnicas de seguimiento de vehículos espaciales, comunicaciones y física solar, especialmente análisis de fulguraciones. En 1974 entró en el IAC, donde ha continuado trabajando en este último campo. Manuel Vázquez Abeledo estudió en la Universidad de Madrid, aunque defendió su tesis doctoral en la de La Laguna (Canarias) en 1974. Cuatro años antes había ingresado en el IAC. Se ha centrado en la evolución de regiones activas, rotación diferencial y aspectos solares de la actividad estelar. Es representante de España en la JOSO ("Joint Organization for Solar Observations").

DAVID L. WALTZ ("Inteligencia artificial") enseña ingeniería eléctrica en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Allí también es profesor de investigación del Coordinated Science Laboratory. Se doctoró en el MIT en 1972. Siempre le interesó remedar la actuación del sistema nervioso humano: "entre mis primeras ocupaciones en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT estaba el diseño de un sistema de percepción táctil para manos de robot".

RONALD E. ROSENSWEIG ("Fluidos magnéticos") es investigador y jefe del grupo de física de fluidos de la Compañía Exxon Research and Engineering. Cursó ingeniería química, licenciándose en 1955 por la Universidad de Cincinnati, y doctorándose por el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1959. De 1959 a 1962 enseña en el MIT, trasladándose luego a la Avco Corporation. En 1969 es nombrado presidente y director técnico de Ferrofluidics Corporation. Trabajó en esa compañía, con distintos cargos, hasta su ingreso en la Exxon, en 1973. Su interés científico se centra en los coloides y el estudio de la estabilidad hidrodinámica.

DAVID K. LYNCH ("Macareos de marea") trabaja en los laboratorios de Investigación Hughes de Malibu, California, donde se dedica a la óptica y la holografía. Se licenció por la Universidad de Indiana en 1969, doctorándose en astronomía, en 1975, por la Universidad de Texas en Austin. Antes de trasladarse a Hughes desempeñó funciones de investigación en diversas instituciones, entre ellas el Instituto de Tecnología de California, la Universidad de California en Berkeley y el Observatorio Sacramento Peak.

THOMAS D. SEELEY ("Así se funda una colmena") enseña biología en la Universidad de Yale. Licenciado por el Dartmount College en 1974, en 1978 se doctoró en biología por la Universidad de Harvard. Recibe luego una beca de esa institución que le permite pasar un año en las junglas de las montañas de Thailandia, donde estudió la ecología de las abejas de esa zona. Desde su incorporación a la Facultad de Yale ha investigado especialmente la estrategia general de alimentación de las colonias de abejas. Escribe: "mi interés por las socidades altamente evolucionadas de abejas melíferas refleja mi profundo placer por la observación de individuos (por más que no sean más que insectos) que viven juntos en sociedades armoniosas".

F. RICHARD STEPHENSON ("Eclipses históricos") es profesor de investigación de la Universidad de Durham. Nacido en Inglaterra, cursó el primer ciclo de estudios universitarios en Durham, doctorándose en geofísica por la Universidad de Newcastle upon Tyne. De 1972 a 1979 estuvo becado para investigar en ese centro. En 1979 se traslada a la Universidad de Liverpool, donde trabajó hasta el pasado mes de octubre. Ha prestado particular atención a las observaciones astronómicas del pasado y su aplicación a problemas actuales de astronomía y geofísica. Es coautor, con David H. Clark, de *The Historical Supernovae* (Pergamon Press, 1977) y *Applications of Early Astronomical Records* (Adam Hilger Ltd., 1978). Dice sentir "un profundo reconocimiento de gratitud hacia los astrónomos de las edades antigua y media por los registros que nos han legado".

Hace...

José. M.ª López Piñero

... trescientos años

Se publicó la *Pragmatica en que su Magestad declara, que el mantener, ni aver mantenido fabricas de sedas, paños, telas, y otros qualesquier texidos, no ha sido, ni es contra la calidad de la Nobleza*, generalmente considerada como un hito de la superación en España de la "deshonra legal" del trabajo manual y la actividad técnica.

La investigación histórica especializada ha demostrado el desprecio que la cultura clásica, monopolizada por el estrato social de los privilegiados, tuvo hacia el trabajo manual, así como la separación efectiva que en la sociedad antigua existió entre el saber teórico y la actividad técnica. La expresión tópica de esta valoración negativa son los conocidos textos de las *Leyes* de Platón y de la *Política* de Aristóteles, responsables de la tradición que privaba a los "operarios mecánicos" de consideración social y que identificaba los términos "artes mecánicas" y "artes serviles", en contraposición con las "artes liberales" y con el prestigio de los cultivadores del saber teórico. Esta valoración correspondía, además, a las circunstancias reales de la ciencia y de la técnica. Aunque resulta excesivamente esquemático afirmar que la primera se redujo a doctrinas generales sin conexión alguna con la práctica, y la segunda a la realización de tareas prácticas sobre una exclusiva base empírica, es indudable la escisión que existió entre ambas. Los factores que intervinieron en ella fueron muy complejos. Resulta, sin embargo, necesario recordar la influencia decisiva que tuvo el carácter esclavista de la estructura económica y social del mundo antiguo, así como el peso negativo que ejerció el método deductivo y esencialista que entonces utilizaba el saber científico, dentro del cual la práctica no era nunca una "prueba" sino una mera "ilustración".

Las primeras señales de una nueva valoración positiva de la técnica se produjeron durante la Baja Edad Media y adquirieron firmeza e importancia a lo largo del Renacimiento. Sin embargo, la ruptura en profundidad con la tradición clásica no se produjo en este terreno hasta el último tercio del siglo XVII, en el momento histórico al que corresponde la *Pragmática* citada. En él se produjeron una serie de transformaciones de las estructuras socio-económicas que constituye una de las raíces de la España de la Ilustración. Este fue, como es sabido, el marco histórico del llamado movimiento *novator*, responsable de la introducción en nuestro país de la ciencia moderna.

El movimiento renovador, además de modificar en sentido positivo su estimación social, tendió a superar la distancia tradicional entre saberes científicos y problemas prácticos, es decir, a transformar la técnica en "ciencia aplicada". Dicha tendencia es bien visible en la actividad de los principales *novatores*. Su carácter típicamente preilustrado se manifiesta, por ejemplo, en el interés de Juan Caramuel por reeditar en 1678, traducida al castellano, la parte técnica de su *Cursus Mathematicus*, y en la significativa dedicatoria al príncipe Juan José de Austria que la precede.

También en este terreno es más importante la contribución del astrónomo y matemático José de Zaragoza. Desde su cátedra en el Colegio de San Isidro, de Madrid, actuó como consejero científico en la resolución de numerosos problemas técnicos: examinó las "relaciones" de una mina descubierta en Chilapa, redactó un memorial sobre diferentes obras hidráulicas en varias localidades castellanas, informó acerca de un proyecto de construcción de un muelle en Sanlúcar, estudió las condiciones de explotación de las minas de Almadén, etcétera. Especialmente notable fue su trabajo sobre estas últimas, efectuado hacia 1674. Levantó un plano muy detallado de sus galerías, tarea para la que usó el "triángulo filar", instrumento ideado y construido por él mismo. Asimismo, participó directamente en la supervisión de los trabajos de reforma y reparación.

Aparte de las referencias a problemas de náutica contenidas en un gran tratado de astronomía, Zaragoza publicó una obra de carácter técnico. Se titula *Fábrica y uso de varios instrumentos matemáticos* (1675) y está dedicada al propio monarca Carlos II. En ella describe una serie de aparatos de su invención, entre los que se encuentran el "triángulo filar" antes citado, una ballestilla perfeccionada, un modelo de pantógrafo, el primer aparato goniométrico provisto de anteojos del que tenemos noticia en España, una cadena de agrimensor con los pies y los pasos marcados, un anteojo de cuatro lentes, etcétera. Todos ellos fueron materialmente construidos por Zaragoza, que se esfuerza por destacar su utilidad para la topografía, la náutica y especialmente para la ingeniería militar. "La exposición de su empleo bélico –afirma Cotarelo– constituye un verdadero tratado de fortificación o arquitectura militar, comprensivo no menos de sesenta y siete páginas, y es el principal intento del libro."

Resulta de máximo interés que este libro de Zaragoza fuera agriamente criticado por el capitán e ingeniero militar Andrés Dávila y Heredia, es decir, el mismo personaje que encabezó los ataques contra la *Carta* de Juan de Cabriada, manifiesto del movimiento *novator* en el terreno de los saberes biomédicos y químicos. Encontramos en su crítica a Zaragoza un expresivo testimonio de la concepción tradicionalista de la técnica. Le irrita especialmente que un científico resuelva problemas de carácter técnico, porque en su opinión "quieren más práctica que especulativa" y se esfuerza inútilmente en demostrar que, en Almadén y Zaragoza "gastó a S.M. mucho dinero y no hizo nada". Su imagen de la técnica, como una tarea de base fundamentalmente empírica, choca con su conversión en una "ciencia aplicada" en manos de un hombre de la formación del jesuita: "Lo que más me admira es, que si se trata de minas, V. Reverendísima dice que lo sabe; si es de nivelación y guiar riegos, también lo sabe; si es perspectiva, también dice lo sabe; si es cosmografía, también dice lo sabe; P. Reverendísimo, dígame la senda por donde lo ha adquirido, porque si es en los Colegios de Mallorca, digo desde luego que no lo sabe". No pudo andar Dávila más desencaminado en el ataque, si recordamos lo que Vicente Mut y el ambiente de Mallorca habían

significado en la formación científica del jesuita valenciano. No se olvide que Mut había escrito entre otras obras técnicas, unas *Adnotaciones sobre los compendios de artillería* (1668) y una *Arquitectura militar* (1664).

Muy distinta fue la actitud de otros ingenieros civiles y militares, que asimilaron a través de los libros y de la relación personal con Zaragoza buena parte de sus ideas. El más importante de todos fue el valenciano José Chafrión, discípulo al mismo tiempo de Caramuel. Chafrión dirigió la construcción de fortificaciones en Cataluña y en el Milanesado y publicó una *Planta de las fortificaciones de las ciudades, plazas y castillos del estado de Milán* (1687), así como un volumen titulado *Escuela de Palas* (1693), curso matemático aplicado a la ingeniería militar. En esta última obra dedica un capítulo o "tratado" a la contribución de Zaragoza al "arte militar", elogiándola en una línea que constituye el reverso de los ataques de Dávila: "Si toda su vida se hubiere criado en los ejércitos, no podría discurrir con mayor propiedad que lo hace".

También Juan Bautista Corachán y Tomás Vicente Tosca desplegaron una actividad técnica similar a la de Zaragoza. Conocemos en detalle, por ejemplo, su intervención en las reformas del puerto de Valencia, en las que también participó José Chafrión. Por otra parte, en las obras inéditas de Corachán hay numerosas referencias a problemas prácticos, mientras que el *Compendio Mathemático* de Tosca incluye una exposición sistemática de los principales aspectos de la técnica. Encontramos en él "tratados" independientes de "maquinaria", de "hidrotécnica e hidrometría" , de "arquitectura civil, montea o cantería", de "arquitectura militar, pirotecnia y artillería" y de "náutica". La influencia de esta obra en los ambientes técnicos fue, además, muy considerable. Sirvió, por ejemplo, de libro de texto en la Academia (militar) de Matemáticas fundada en Barcelona a finales del siglo XVII.

La máxima figura de la ingeniería militar española de esta época fue Sebastián Fernández de Medrano. Destacado desde muy joven por sus conocimientos de matemáticas, fortificación y táctica, Fernández de Medrano fue nombrado en 1675 "maestro" de la Academia Militar de Bruselas, siendo ascendido a director en 1692, cuando este centro creció en importancia. Asistían entonces a él –afirma Vigón– "veinte o treinta oficiales de distintos Cuerpos que allí seguían un curso de un año –o de dos los más aprovechados–, al final de los cuales recibían el diploma de ingenieros".

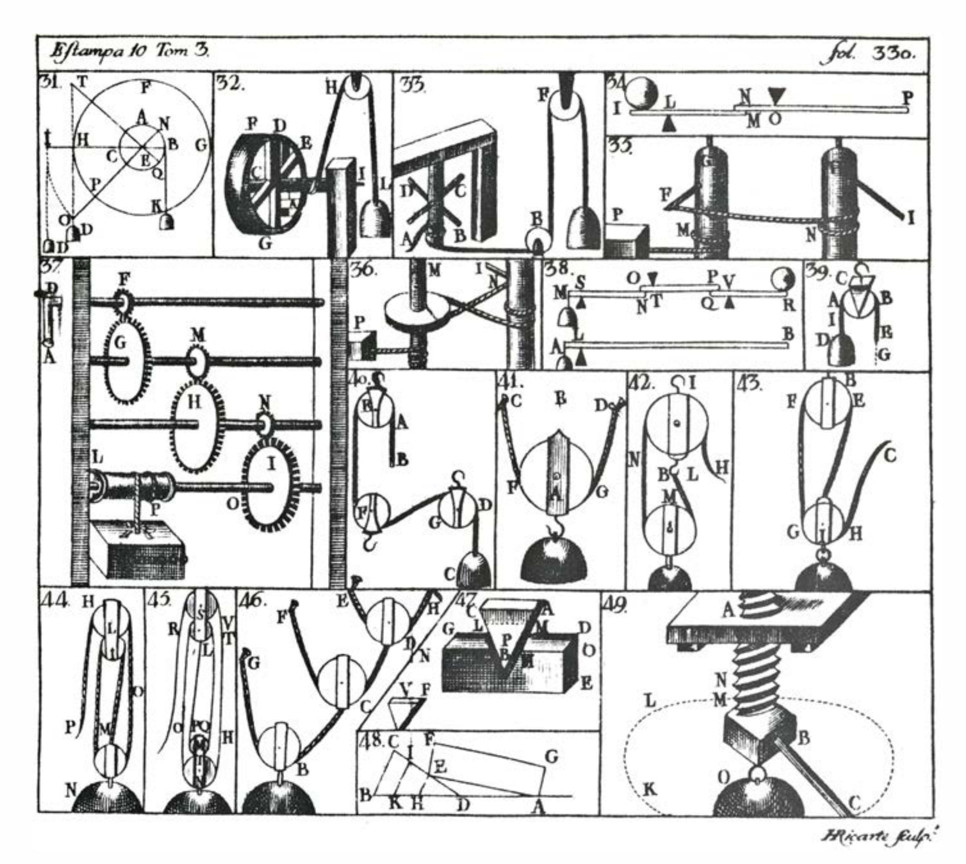


Lámina del "Tratado de la maquinaria" incluido en el **Compendio Mathematico**, *de Tomás Vicente Tosca (1.ª ed., 1707-1715)*

Medrano fue autor de varias obras de matemáticas y de geografía. Reimprimió "amplificada de nuevas demostraciones" (1708) la edición de *Los seys primeros libros* de Euclides, preparada por Francisco Larrando de Maulión, y escribió otras obras matemáticas menores. Publicó también varios estudios monográficos y un tratado general de geografía, cuya cuarta edición, titulada *Geographía o moderna descripción del mundo* (1700) es quizás el mejor texto de esta disciplina aparecido en la España de estos años. No obstante, su principal contribución pertenece a la ingeniería militar. Publicó un manual de artillería (1691) que alcanzó varias reimpresiones, y un excelente tratado de "moderna arquitectura militar" (1687), que asimismo tuvo diversas reediciones y que fue traducido al francés en 1696. La posición ideológica de Medrano puede equipararse, desde muchos puntos de vista, a la de los tradicionalistas "moderados". En lo tocante a la concepción de la técnica, tuvo clara conciencia de la necesidad de fundamentarla en los saberes científicos: "Andaba siempre continuando en lo que había emprendido de adquirir la matemática –afirma en su autobiografía– valiéndome de uno y otro libro, y siendo cosa tan enajenada en toda la Monarquía en aquel tiempo, los oficiales de mi tercio me tenían por loco".

El único terreno dentro de las aplicaciones de las ciencias matemáticas, astronómicas y físicas en el que se puede hablar de un movimiento de renovación con las características típicas que hemos podido comprobar en los saberes médicos, biológicos y químicos, es el arte de navegar. El esquema de los tres períodos de la ciencia española del siglo XVII se cumple paradigmáticamente en esta disciplina. En el primer tercio de la centuria, los grandes autores españoles del siglo XVI –Martín Cortés, Medina, Zamorano, etc.– continúan dominando la náutica europea; basta comprobar las ediciones inglesas, francesas, holandesas, italianas, etc. que alcanzan entonces sus obras. La parte central del siglo corresponde al hundimiento de los últimos restos de esta brillante tradición, con la desaparición incluso de las enseñanzas de náutica de la Casa de Contratación, de Sevilla, y de la Academia de Matemáticas, de Madrid. La tercera etapa significa claramente el comienzo de una nueva épo-

ca, encabezada por autores como Seijas Lobera y Gaztañeta, y con la fundación de una institución típicamente "moderna": el Colegio de San Telmo de Sevilla.

La biografía de Francisco Seijas y Lobera le permitió tener un contacto directo con las nuevas corrientes científicas y técnicas europeas. Nacido en Mondoñedo, tras terminar sus estudios en artes, comenzó muy joven a navegar en barcos holandeses, franceses, portugueses y españoles. Con ellos recorrió buena parte del mundo, desde el Mediterráneo oriental y el norte de Europa, hasta la India y China, los mares del Sur y las posesiones españolas en América. Desplegó una gran actividad cartográfica y dejó varios manuscritos de matemáticas y también de metalurgia, disciplina de la que se ocupó durante su estancia en América. Publicó una *Descripción geográfica y derrotero de la región austral Magallánica* (1690), pero su obra fundamental fue el *Teatro naval hidrográfico* (1688), excelente exposición de los flujos y corrientes marinas, de los vientos "generales y particulares" y de las variaciones de la aguja de marear. Plagiada al parecer por Pedro de Castro, fue editada en francés en París el año 1704, fecha en la que el marino y cosmógrafo gallego vivía en dicha ciudad en activa relación con los científicos allí residentes.

La estructura del Colegio de San Telmo –fundado en Sevilla el año 1681– preludia la que tendría otros centros ilustrados durante el siglo XVIII. Recogía a niños huérfanos, que convertía en pilotos con una sólida formación científica. El texto más destacado dentro de la primera producción escrita que salió de esta institución fue el *Norte de Navegación* (1692), de Antonio de Gaztañeta, autor que introdujo importantes novedades técnicas en la náutica española, como el *quartier*, o cuadrante de reducción de Blondel de Saint-Aubin, y la *corredera* inventada por Bourne. En cartografía, fue también uno de los primeros españoles que utilizó sistemáticamente la proyección esférica de Mercator. Como la mayor parte de nuestros *novatores*, fue partidario –al menos públicamente– del sistema astronómico de Tycho Brahe en su versión "modernizada".

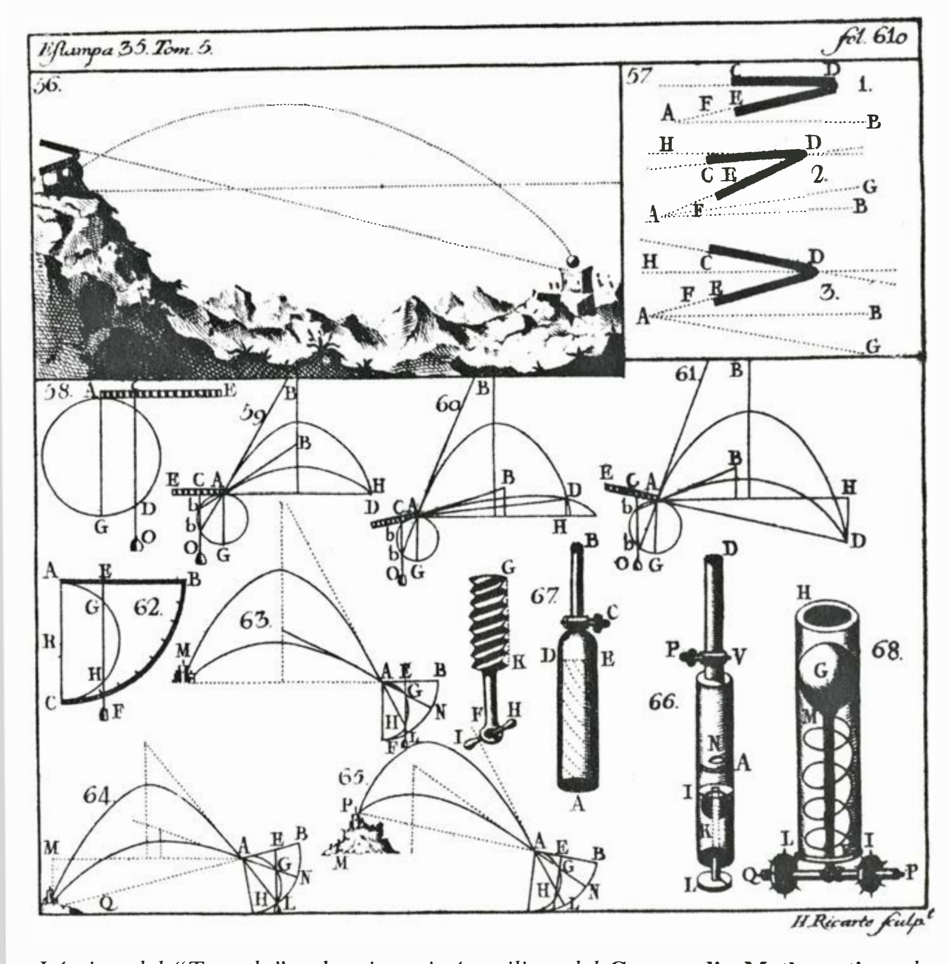


Lámina del "Tratado" sobre ingeniería militar del **Compendio Mathematico**, *de Tosca*

Verificación de una prohibición absoluta de pruebas nucleares

Redes de instrumentos sísmicos podrían controlar, con suma fiabilidad, la prohibición absoluta de todo tipo de ensayo nuclear. Su capacidad de detección delataría inmediatamente cualquier prueba clandestina

Lynn R. Sykes y Jack F. Evernden

La firma de dos tratados negociados a lo largo de estos últimos 20 años establece los límites de los ensayos con armas nucleares. El tratado sobre prohibición restringida de los ensayos, suscrito en 1963 por más de 120 naciones, prohíbe explosiones nucleares en la atmósfera, los océanos y el espacio; se permiten las explosiones subterráneas. El tratado sobre prohibición de ensayos a partir de cierto umbral, acuerdo bilateral firmado por los Estados Unidos y la Unión Soviética, limita los ensayos subterráneos de armas nucleares a los de una potencia inferior a los 150 kilotones. Dado el actual clima de opinión a favor de un control más eficaz del armamento nuclear, se presta de nuevo atención a la idea de una prohibición absoluta de cualquier prueba nuclear. Un acuerdo de ese tipo supondría, sin duda, una medida de gran importancia. Quizá limitase el desarrollo de nuevas armas por las principales potencias y pondría freno a la transferencia de tecnología de armas nucleares a otros países.

La suspensión total de cualquier ensayo constituía la meta original de las negociaciones que concluyeron en el tratado sobre prohibición restringida de los ensayos, de 1963. En 1977, los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña iniciaron nuevas conversaciones encaminadas a lograr ese viejo deseo, pero las negociaciones se rompieron en 1980. En ambos casos, el mayor impedimento para la firma de un acuerdo ilimitado fueron las reservas expresadas por los Estados Unidos y Gran Bretaña sobre la verificación del cumplimiento del tratado, pues las explosiones subterráneas suficientemente débiles escaparían a una identificación y detección segura. En julio de este año, la administración Reagan anunció que no se reanudarían las negociaciones sobre la prohibición de ensayos nucleares con la Unión Soviética y Gran Bretaña. Por la misma razón: falta de confianza en los métodos que tendrían que verificar su cumplimiento.

En 1963, cabía discutir todavía la fiabilidad de las medidas que habrían de comprobar la existencia de explosiones superiores al kilotón, prohibidas por el acuerdo. Pero hoy esa posición no se sostiene. Hablamos como sismólogos empeñados, durante muchos años, en la detección de explosiones subterráneas por métodos sísmicos y en la distinción entre una explosión subterránea y un terremoto. Estamos convencidos de que el nivel actual de conocimientos en sismología y en las técnicas de control de ondas sísmicas permite asegurar que una red adecuada de instrumentos detectaría de inmediato cualquier programa clandestino de ensayos subterráneos que abarcara explosiones de sólo un kilotón. En resumen, se dan ya las condiciones técnicas necesarias para vigilar una prohibición irrestricta de ensayos, por pequeñas que sean las explosiones muy pequeñas. Los problemas pendientes son de carácter político.

Una explosión subterránea produce vibraciones elásticas que se propagan en ondas sísmicas a través de la tierra y a lo largo de la superficie. Las ondas recorren grandes distancias; los instrumentos de registro sísmico gozan hoy de sensibilidad suficiente para captar hasta las ondas generadas por explosiones muy débiles. Detectadas las ondas, urge distinguir las señales sísmicas producidas por explosiones de las que generan los terremotos. Tarea que puede cumplir una buena red de sismómetros convenientemente distanciados.

A través de la masa sólida de la tierra, esto es, a través de la corteza y del manto, pueden propagarse dos tipos de vibraciones elásticas. Las primeras ondas que alcanzan el sismómetro son de compresión, similares a las ondas sonoras que se desplazan por el agua o el aire; su nombre en sismología es el de ondas *P* (de primarias). Las ondas más lentas por la materia sólida son las cortantes, o de cizalla, análogas a las ondas producidas en una cuerda en vibración; se denominan *S* (de secundarias). Una explosión nuclear subterránea es una fuente casi pura de ondas *P*, porque aplica una presión uniforme a las paredes de la cavidad que crea. Un terremoto, en cambio, se genera al deslizarse rápidamente dos bloques de corteza terrestre a lo largo de un plano de falla. A consecuencia de este movimiento en tijera, un terremoto emite, predominantemente, ondas *S*.

En virtud de la simetría esférica de la fuente de la explosión, todas las ondas sísmicas que genera presentan una simetría casi radial alrededor del foco de explosión. Por contra, el carácter marcadamente direccional de la fuente de un terremoto origina ondas sísmicas con dibujos muy asimétricos. La asimetría de la amplitud de las ondas registradas por los sismómetros repartidos por todo el mundo les permite a los geólogos determinar el mecanismo de falla de cualquier terremoto que se produzca.

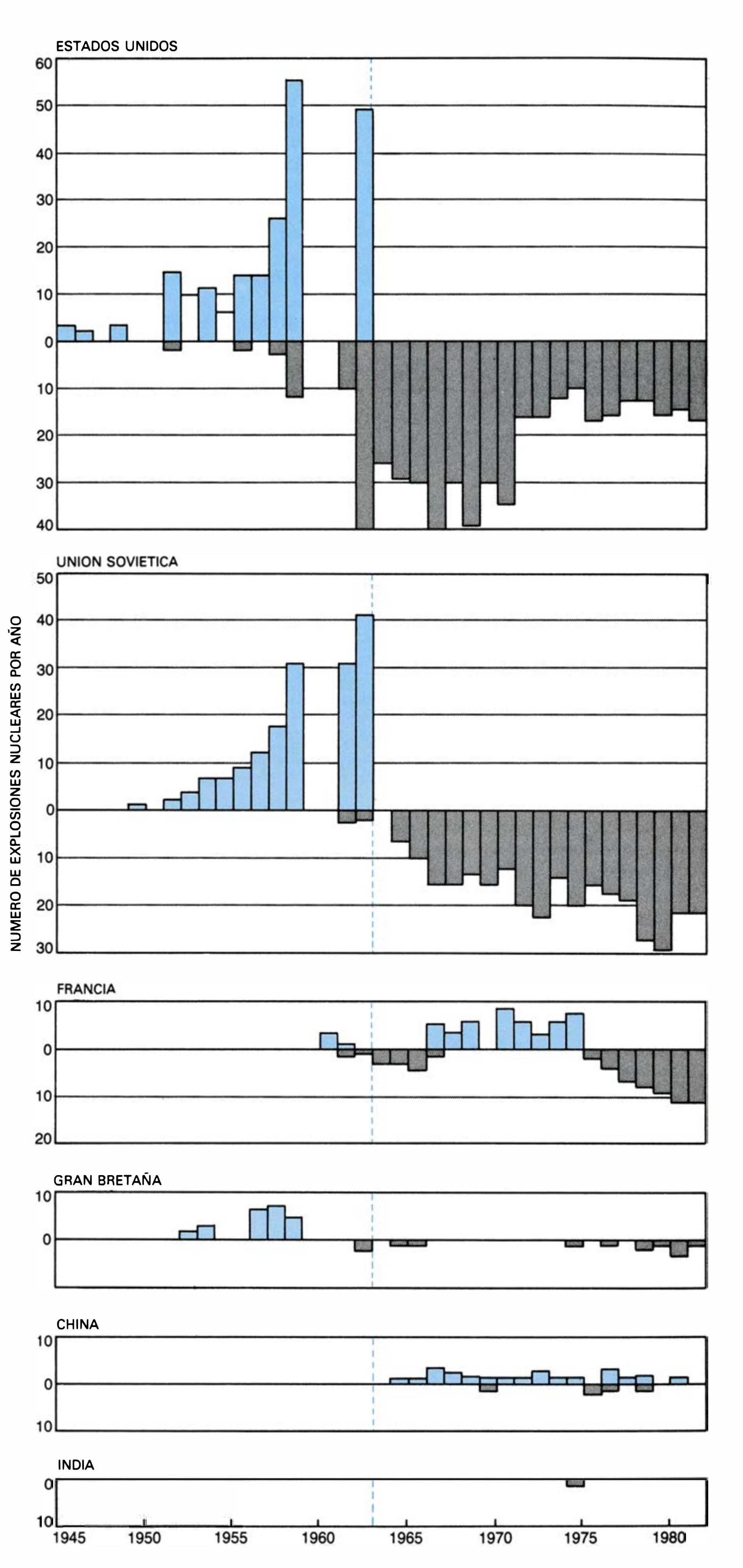
Además de las ondas *P* y *S* de la materia sólida, existen otros dos tipos de ondas sísmicas que se propagan sólo por la superficie de la tierra. Se trata de las ondas Rayleigh y Love. Proceden de reflexiones complejas de parte de la energía que portan las ondas de los estratos superiores de la corteza terrestre. Una simple explosión genera ondas Rayleigh, pero no ondas Love; un terremoto las genera de ambos tipos.

Los sismólogos determinan el calibre de un fenómeno sísmico a través de va-

rias magnitudes. A cada seísmo se le asignan diversos valores, atendiendo cada uno a un tipo distinto de onda sísmica. Se entiende por magnitud el logaritmo de la amplitud de un determinado tipo de onda, normalizado para la distancia y la profundidad del foco. De las diversas magnitudes que pueden definirse en un seísmo nos ocuparemos aquí de sólo dos, las que en notación sismológica se expresan por M_S y m_b. La primera suele basarse en ondas Rayleigh de 20 segundos de período, la segunda en ondas *P* de un segundo. La magnitud de la señal sísmica se relaciona, en última instancia, con la energía liberada en el lugar donde se genera. En una explosión nuclear suele medirse la energía liberada en kilotones (un kilotón es la energía que libera la detonación de 1000 toneladas de TNT).

Todos los años se producen numerosos terremotos cuyas magnitudes se sitúan en la categoría que corresponde a las explosiones subterráneas. Son varios los métodos aplicables a las ondas sísmicas para discriminar entre ellas cuáles nacen de una explosión y cuáles se generan por terremoto. La localización del fenómeno sísmico y su profundidad son criterios importantes; de hecho, la inmensa mayoría de los fenómenos detectados rutinariamente pueden catalogarse como terremotos porque se producen a gran profundidad o en un lugar poco probable para una explosión. Los demás pueden clasificarse, con suficiente fiabilidad, por la cantidad de energía irradiada en los distintos tipos de ondas a diversas frecuencias.

Una poderosa herramienta de clasificación es la determinación de la latitud y longitud del fenómeno. La posición se establece registrando los tiempos de llegada de las ondas *P* de período corto a varias estaciones sismográficas repartidas por el mundo. El tiempo que tardan las ondas *P* en llegar a cada estación es función de la distancia y profundidad del foco. A partir de los tiempos de llegada, se precisa la localización de la fuente con un error absoluto inferior a 10 o 25 kilómetros, si los datos sísmicos son de alta calidad.



SIGUEN REALIZANDOSE pruebas nucleares, a un ritmo de 50 ensayos por año. Las dos potencias mundiales, Estados Unidos y la Unión Soviética, son responsables de la mayoría de ellas. Como se desprende del diagrama, el efecto principal del tratado sobre prohibición restringida de los ensayos, que se suscribió en 1963 (*línea de color divisoria*), no ha sido reducir el número de pruebas, sino llevarlas al subsuelo. Las explosiones provocadas en la atmósfera y submarinas se representan por las barras de color; la subterráneas, por barras grises.

La identificación de seísmos en el mar no encierra mayores complicaciones. Cabe suponer que la red de control de un tratado de suspensión de ensayos dispondría de estaciones hidroacústicas sencillas instaladas en las costas oceánicas y en islas de especial ubicación para medir las ondas de presión en el mar. La señal hidroacústica de una explosión submarina difiere tanto de la que genera un terremoto, y puede detectarse en un margen tan amplio, que la discriminación de un fenómeno sísmico marino como terremoto o explosión es inmediata e inequívoca. Por tanto, cualquier episodio localizado al menos 25 kilómetros mar adentro (margen que se deja a los errores) puede catalogarse como terremoto por su ubicación y el carácter de su señal hidroacústica.

Se ha estimado con qué precisión puede determinarse la localización de un fenómeno sísmico en el mar de un arco de islas. Se instaló para ello una serie de sismómetros en los fondos marinos de la península de Kamchatka y de las islas Curiles, en la Unión Soviética. Los ensayos revelan que la precisión de una red sismográfica supera con mucho, en esas circunstancias, los 25 kilómetros. Tomando ese valor como referencia, se descubre que bastante más de la mitad de los temblores ocurren en el mar y, por tanto, es fácil identificarlos como movimientos sísmicos.

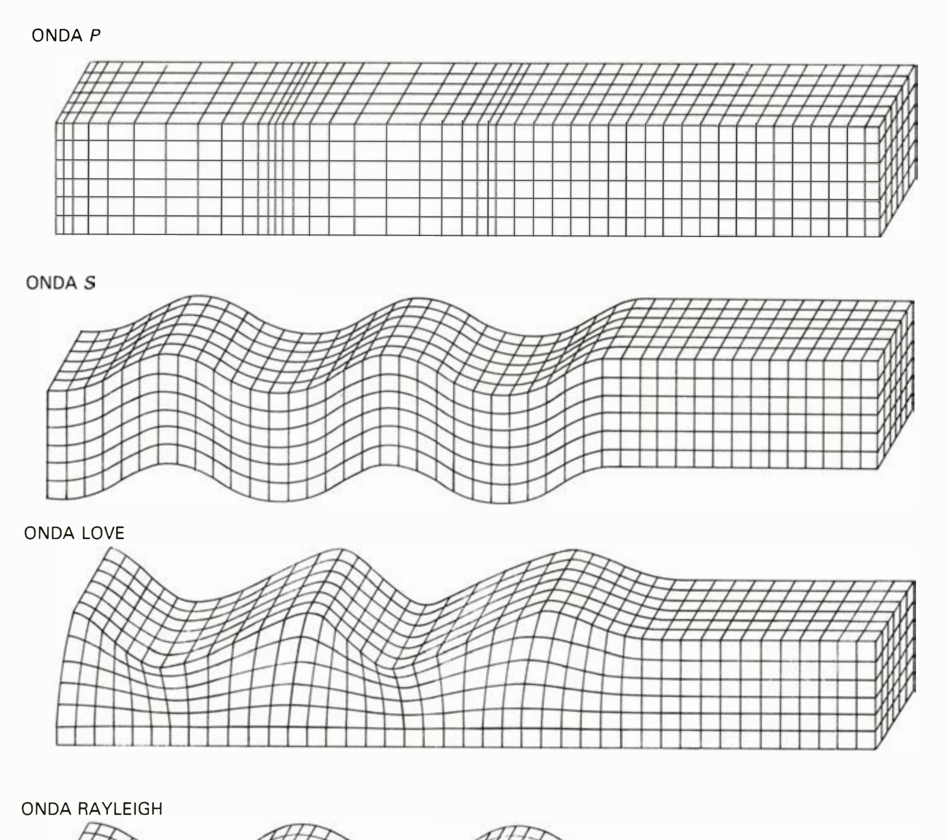
Otro grupo nutrido de fenómenos detectados tiene sus epicentros en tierra, en zonas donde no cabe esperar que se produzcan explosiones. También esos fenómenos pueden catalogarse sin miedo a errar entre los terremotos. La verdad es que casi toda la actividad sísmica mundial se concentra en regiones carentes de interés para el control del cumplimiento de una suspensión absoluta de pruebas nucleares. Por tanto, la mera localización de los fenómenos sísmicos descubre ya que la mayoría de ellos son terremotos.

El cálculo de la profundidad del foco nos va a decir dónde encuadrar un buen número de los temblores restantes. Del 55 al 60 por ciento de los terremotos que ocurren en la tierra se producen a profundidades superiores a los 30 kilómetros; un mínimo de un 90 por ciento de ellos tiene el foco a más de 10 kilómetros de profundidad. Cualquier fenómeno sísmico situado por debajo de los 15 kilómetros es, sin duda, un terremoto. Nadie ha perforado aún la corteza terrestre hasta los 10 kilómetros; las explosiones nucleares más profundas de que se tenga noticia han detonado a unos dos kilómetros.

Son varios los procedimientos sismológicos a emplear para determinar la profundidad del foco de un episodio. En la mayoría de los casos se mide hondura y localización, a un tiempo. Si un seísmo se detecta en 20 o más estaciones, la estimación de una profundidad de 30 kilómetros o más, calculada por un procedimiento rutinario, asegura, con un nivel de confianza del 95 por ciento, que el fenómeno se produjo al menos 15 kilómetros suelo adentro.

Puede aplicarse una poderosa técnica para estimar la profundidad si hay una estación sismográfica a escasos centenares de kilómetros del fenómeno detectado. (Una red de control del cumplimiento de una prohibición total de ensayos reuniría sin duda estas características en las zonas de presumible experimentación.) Un par de ondas *P* y *S* generadas simultáneamente y registradas en una estación próxima al fenómeno, aunque siguen igual camino, se propagan a distinta velocidad. La diferencia en sus tiempos de llegada, o lo que es lo mismo, la diferencia de sus fases, permite precisar el momento en que se produjo el fenómeno. El experto sabe analizar los sismogramas de la estación cercana al seísmo hasta el punto de detectar un par, al menos, de las fases de *P* y *S*. Conocidos así el momento de origen y los tiempos de llegada de las ondas *P* a unos cuantos receptores lejanos, podremos deducir un cálculo fidedigno de la profundidad del foco.

Cabe que, a pesar de todo, queden regiones sísmicas importantes sin ninguna estación próxima a ellas. En esa hipótesis, se echará mano de los datos de los fenómenos de mayor alcance para refinar el cálculo de la profundidad y localización de los episodios menores. En esencia, la técnica consiste en corregir los tiempos observados en los fenómenos débiles a partir de las diferencias

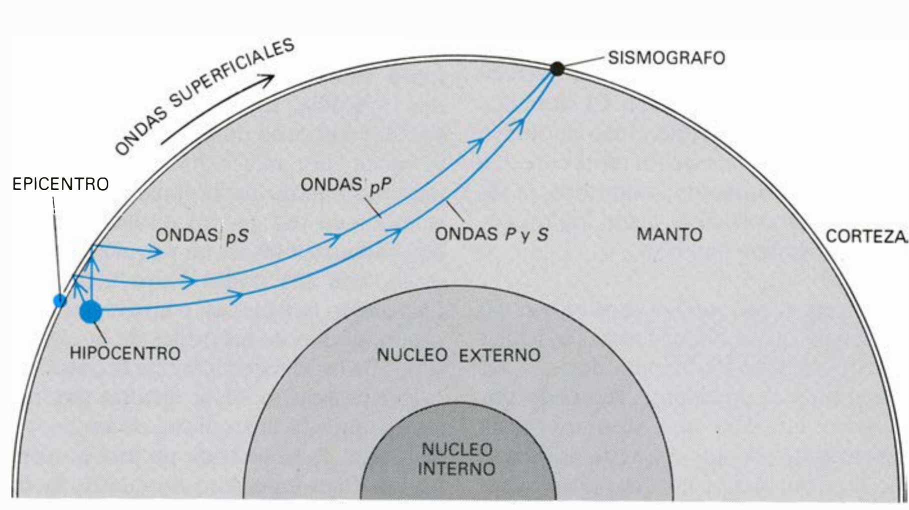


CUATRO TIPOS DE ONDAS SISMICAS. Las dos primeras, empezando por arriba, se propagan a través de la franja sólida de la tierra; las dos inferiores lo hacen sólo cerca de la superficie. Las ondas de compresión, llamadas ondas *P* (de primarias) son las que viajan más deprisa y las que antes llegan al sismógrafo; predominan en la explosión subterránea. Más lentas, las ondas *S* (de secundarias) vibran en un plano transversal a su dirección de propagación y constituyen el tipo dominante entre las producidas por un terremoto. Las ondas superficiales se dividen en dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love. Débense ambas a reflexiones complejas de las ondas *P* y *S* en las capas superiores de la corteza terrestre.

que presentan los tiempos estimados y observados en fenómenos de gran potencia en la misma zona. Varias redes utilizan ya este procedimiento.

Es impresionante la solidez que manifiesta la determinación simultánea de la profundidad y la localización a la hora de distinguir entre explosiones y terremotos. Más del 90 por ciento de todos los terremotos ocurren bajo los océanos o a más de 30 kilómetros de profundidad (o ambas cosas a la vez). La mayoría de los terremotos restantes no ofrecen interés, pues se producen en países donde no resultan verosímiles las pruebas nucleares o en naciones donde sería imposible un ensayo clandestino. Para Europa y los Estados Unidos, la Unión Soviética constituye, desde luego, el foco de mayor interés. Un 75 por ciento de los temblores que sacuden el territorio soviético o sus aledaños se localizan en la parte oriental del estado, en las proximidades de la península de Kamchatka y de las islas Curiles. La práctica totalidad de los seísmos de esas zonas presentan una profundidad focal superior a los 50 kilómetros u ocurren muy lejos de las costas. Los episodios cuya posición se sitúa en tierra firme o en los primeros 25 kilómetros costeños, y cuya profundidad estimada es inferior a los 50 kilómetros, apenas suponen el 0,5 por ciento de los terremotos mundiales. Lo que suma unos 100 seísmos al año de una magnitud m_b superior a 3,8. En estos casos hay que valerse de otros discriminantes sísmicos.

Ninguna de las medidas comentadas hasta ahora se funda en la naturaleza de las ondas irradiadas por terremotos y explosiones. Pero hay varios discriminantes de gran potencia que se basan, justamente, en los rasgos característicos; en particular, en las cantidades relativas de energía de las ondas de distintos tipos y períodos. Un terremoto somero genera ondas Rayleigh de 20 segundos, cuya amplitud es varias veces superior que las de las ondas procedentes de una explosión que desprende la misma cantidad de energía. En la notación de uso en sismología, la relación entre ambas magnitudes se expresa en forma cociente M_S/m_b: razón entre ondas de período largo y ondas de período corto.



MOVIMIENTOS DE LAS ONDAS SISMICAS esquematizados en un corte transversal de la tierra. Las ondas interiores de un terremoto o de una explosión viajan a través de la corteza y el manto siguiendo caminos curvados, rotulados aquí por *P*, *S*, *pP* y *pS*. Una onda *pP* es una onda de compresión que se produce por la reflexión de otra *P* en la superficie de la tierra, encima mismo del temblor o la explosión; una onda *pS* es una onda cortante que se produce de la conversión de parte de la energía de compresión, de una onda *P* dirigida hacia arriba, en energía transversal cuando la onda *P* se refleja en la superficie. Las ondas superficiales –las de Rayleigh y las de Love– disminuyen rápidamente en amplitud a medida que aumenta la profundidad. Se llama hipocentro al foco de un terremoto o de una explosión de donde radian las ondas. Y epicentro al punto de la superficie que queda por encima mismo del hipocentro.

Un segundo discriminante del espectro se basa en la observación de que las ondas *P* y *S* de largo período rara vez, o nunca, van asociadas a explosiones; pero los simómetros detectan una u otra, de forma rutinaria, en la mayoría de los terremotos cuya onda *P* de un segundo tiene una magnitud de al menos 4,5. En las estaciones sismográficas mejor dotadas, y aplicando a la señal análisis más elaborados, puede rebajarse la magnitud a la que se detectan.

Una tercera razón de distinción. Las ondas superficiales de tipo Love se generan con una intensidad muy superior en los terremotos poco profundos que en las explosiones subterráneas, incluso en el caso de explosiones de inusual fuerza. Y otra característica todavía de la onda sísmica que generan las explosiones: el primer movimiento de la tierra que estimulan las ondas *P* es siempre hacia arriba, porque la explosión se dirige siempre hacia fuera; el primer movimiento que produce una onda *P* nacida en un terremoto puede ser tanto hacia arriba como hacia abajo.

Un importante factor que contribuye a la diferenciación de terremotos y explosiones en los diagramas M_S/m_b es que las ondas *P* de las dos clases de fenómenos muestran distintas distribuciones de radiación. Las explosiones emiten ondas *P* de período corto por igual en todas direcciones, mientras que los terremotos tienen distribuciones muy asimétricas. De ahí que la mayoría de las fuentes de terremotos presenten un decrecimiento de 0,4 a una unidad de magnitud respecto de los valores máximos, al promediar, sobre ángulos de radiación adecuados, las amplitudes de la onda *P*. Una simple explosión no radia, en principio, ondas de corte; por contra, los terremotos generan grandes ondas de corte. En consecuencia, las ondas Rayleigh que se generan en muchos tipos de terremotos ofrecen una amplitud mayor que las correspondientes ondas generadas por explosiones subterráneas del mismo m_b.

La fuente de un fenómeno sísmico tiene un tiempo de formación característico; equivale a la dimensión máxima de la fuente dividida por la velocidad de formación de ésta. En los terremotos, la dimensión de la fuente corresponde a la longitud de la fractura donde se libera la mayor parte de la energía de período corto; es de tres a 20 veces mayor, según el estado de tensión de la roca, que el radio de la cavidad y la zona aplastada de una explosión parangonable. La velocidad de formación de una fuente de terremotos varía desde un valor levemente menor a otro mucho menor que la velocidad de las ondas de corte en las rocas que rodean la falla; la velocidad principal en las explosiones es la de las ondas de choque en las rocas, que viene a ser la velocidad de las ondas de compresión. Consecuencia de estas diferencias en el tamaño de la fuente y velocidad de su formación es que los tiempos característicos de terremotos y explosiones difieren en un factor de seis a 40. No sorprende, por tanto, que se aprecien diferencias entre los espectros de ondas *P* de período corto de los terremotos y las explosiones.

De la observación de varias explosiones norteamericanas se deduce la existencia de un fenómeno denominado sobredisparo (*overshoot*). Guarda relación con las ondas de choque en rocas duras, pero puede imaginarse como el equivalente al aumento de la presión de la cavidad hasta niveles altos seguido de un descenso de la presión en un fac-

tor de cuatro o cinco; se mantiene entonces, durante bastantes decenas de segundos, la presión baja. El sobredisparo, de ocurrir, proporciona un nuevo motivo de discriminación en el espectro de ondas *P*; aumenta, asimismo, la diferencia a través de la razón M_S/m_b para los episodios mayores.

Se creía antes que las explosiones no provocaban ondas Love. Un hecho que obstaculizó de manera decisiva los esfuerzos del presidente Kennedy por alcanzar en 1963 una suspensión sin restricciones de los ensayos nucleares fue la observación de que, en muchas explosiones subterráneas realizadas por los Estados Unidos en Nevada, en particular las detonadas en rocas duras, generaban unas ondas Love inconfundibles. El fracaso del criterio cualitativo "No hay ondas Love en las explosiones" (en un momento en que criterios cuantitativos como la comparación de las magnitudes de las ondas de período corto y largo ni siquiera se habían establecido de forma adecuada) quitaba a los sismólogos autoridad a la hora de defender su capacidad de distinguir entre las ondas sísmicas procedentes de explosiones subterráneas y las que generaban los terremotos.

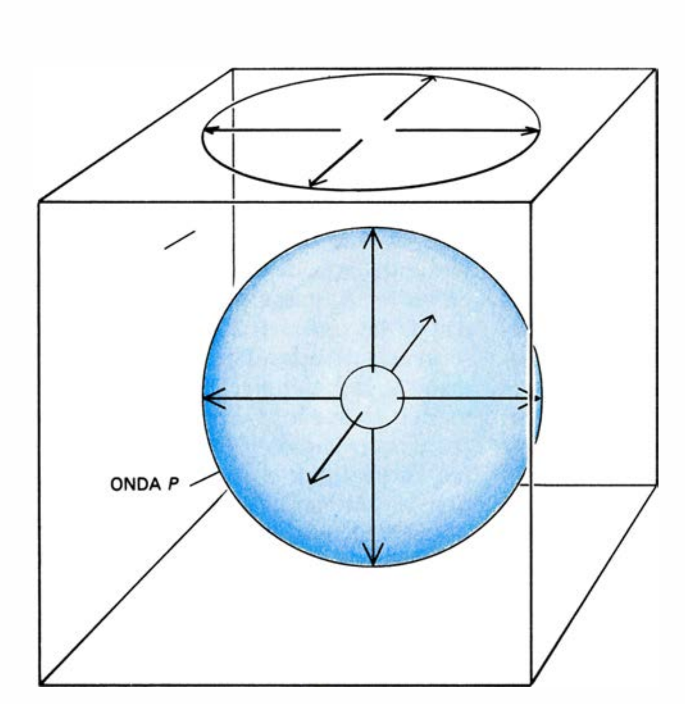
Se sabe por qué aparecieron ondas Love en los ensayos de Nevada. Los primeros análisis no consideraban el influjo del estado de tensión natural de la tierra sobre las ondas generadas por una explosión. La formación de una cavidad, y del cono de aplastamiento que la rodea, por una explosión subterránea relaja parte de la tensión natural, lo que a su vez genera ondas sísmicas equivalentes a las de un pequeño terremoto, con sus ondas Love incluidas. Las ondas detectadas constituyen una superposición de las ondas de la explosión y de las de liberación de la tensión.

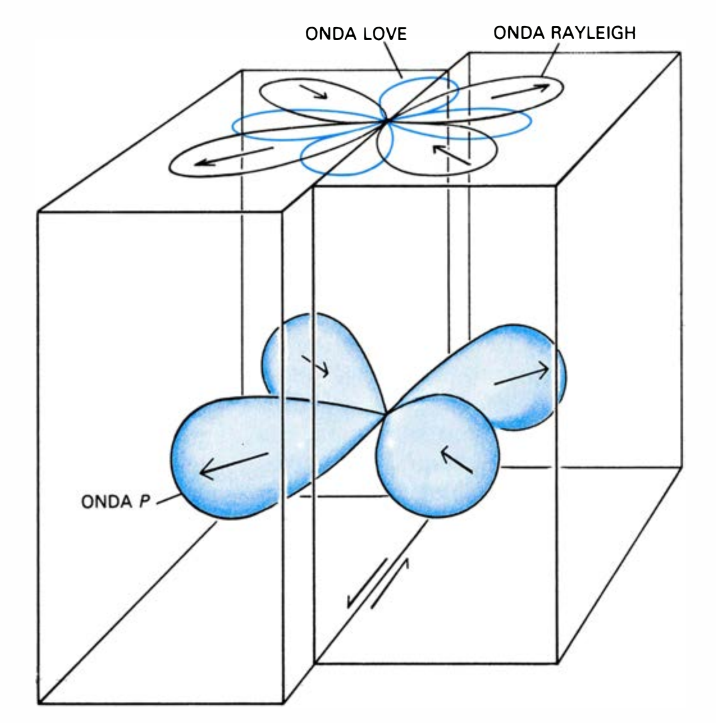
Esa relajación de la tensión natural altera también la amplitud de las ondas Rayleigh. Pero se trata de una perturbación cuya magnitud no cuestiona la naturaleza de un episodio identificado a través de la razón entre ondas de período largo y ondas de período corto. Sólo en contadas ocasiones dicha perturbación afecta, de un modo significativo, a la amplitud de las ondas *P*. Pero no se sabe que haya cambiado nunca el sentido del primer movimiento. Es más, si la magnitud M_S se determina a partir de las ondas Love, y no a partir de las Rayleigh, el método del cociente (M_S/m_b) proporciona un elemento discriminador excelente.

En pocas palabras, si los sismólogos hubieran hecho como Dios manda sus deberes en 1963, las naciones del mundo hubieran quizá firmado un tratado de prohibición irrestricta en aquel momento. Hoy, la liberación de tensiones naturales de la tierra sólo tiene significación en cuanto factor perturbador a considerar cuando se calcula el alcance de una explosión a partir de las ondas Rayleigh.

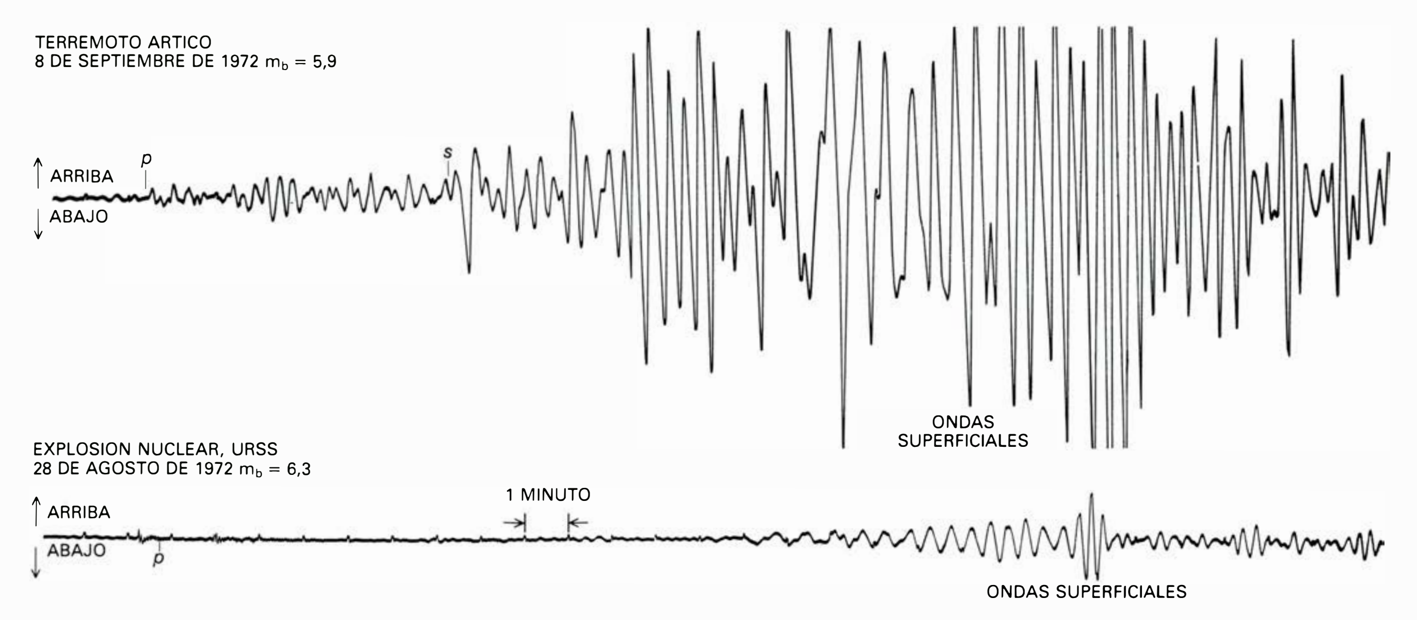
Se aducen ciertos estudios según los cuales los terremotos presentan a veces valores de M_S/m_b parecidos a los que presentan las explosiones, lo que constituiría, se argumenta, un factor que podría impedir un control eficaz de una suspensión absoluta de las pruebas nucleares. Tras analizar gran número de terremotos ocurridos por todo el mundo y de explosiones subterráneas provocadas en los Estados Unidos y en la Unión Soviética, sólo hemos hallado un ejemplo de ese tipo de ambigüedad. El foco del fenómeno se hallaba lejos de la zona donde la red sismográfica ofrece los mejores resultados.

En 1972, en una reunión del Comité de Desarme de las Naciones Unidas, los Estados Unidos presentaron una lista de 25 fenómenos "anómalos" que constituirían otros tantos problemas de discriminación. En 1976, uno de nosotros (Sykes) reanalizó los 25 casos en colaboración con otros dos sismólogos. Robert Tathum y Donald Forsythe. Se dedujo que la mitad, más o menos, de los episodios presentaban valores M_S/m_b que los catalogaban sin ambages entre los terremotos. La mayoría de las magnitudes originales se habían calcu-





FIGURAS DE RADIACION de las ondas *P* producidas por una explosión subterránea (*izquierda*), comparadas con las que origina un terremoto (*derecha*). El primer movimiento de las ondas *P* nacidas en una explosión procede uniformemente hacia fuera, de ahí que se observe como un desplazamiento hacia arriba en todas las estaciones sísmicas. El primer movimiento de las ondas *P* causadas por un terremoto procede hacia fuera en algunas direcciones y hacia dentro en otras. El dibujo de las ondas de superficie depende de la orientación del plano de la falla del terremoto. En el caso bastante simple de una falla vertical con deslizamiento, el que se recoge en esta ilustración, los cuatro diagramas de radiación lobuliformes que se observan en la superficie para las ondas *P* y Rayleigh son la proyección de la configuración tridimensional de las ondas *P* que arranca del hipocentro del episodio. El diagrama de radiación de las ondas Love emitidas por la misma fuente está girado 45 grados en relación con los diagramas de las ondas *P* y las ondas Rayleigh.



SISMOGRAMAS DE ONDAS DE LARGO PERIODO procedentes de un terremoto ocurrido en el Artico, cerca del territorio soviético (*parte superior*) y de una explosión subterránea dentro de la frontera rusa (*parte inferior*), tal como se registraron en la estación sísmica de Elath (Israel), equidistante, más o menos, de los focos de uno y otro suceso. Las ondas de corto período generadas por ambos episodios venían a coincidir en su magnitud. Por contra, la magnitud de las ondas Rayleigh de largo período registradas en los diagramas son mucho mayores para el temblor de tierra que para la explosión. La relación entre las ondas de largo período superficiales y las de corto período del interior se ha convertido en un criterio fiable para distinguir las ondas sísmicas de los terremotos de las que proceden de una explosión nuclear. Añádase, además, que la onda *P* de la explosión tiene más energía de alta frecuencia que su homónima del terremoto. La onda *S* del temblor es grande; pequeña, la de la explosión nuclear, motivo por el cual cuesta apreciarla en el sismograma.

lado a partir de los registros de sólo una estación o dos; ni siquiera se había consultado gran parte de la información disponible. Al examinar los registros de otras estaciones, los fenómenos perdieron su carácter "anómalo".

Las mediciones M_S/m_b basadas en ondas Rayleigh de 20 segundos dieron, para los restantes casos problemáticos, valores que caían en el margen característico de los terremotos. Varios episodios se situaban a profundidades de 25 a 50 kilómetros, donde puede excluirse en todo caso la práctica de ensayos nucleares; pero aún así había que dar explicación del cociente de magnitudes. Se sabe en teoría sismológica que ciertos tipos de terremotos, a esas honduras, son pobres en ondas Rayleigh de período largo. Sin embargo, también predice la teoría que habitualmente se generan con gran intensidad, en esas circunstancias, ondas Love y vibraciones denominadas ondas Rayleigh de frecuencia más alta. El análisis de los registros de ondas Love y de ondas Rayleigh de frecuencia más alta permitió incluir varios casos problemáticos más entre los terremotos.

Quedaba por resolver una secuencia de fenómenos ocurrida en el Tibet. No es probable que se realicen pruebas nucleares en esa zona, pero no podía determinarse con exactitud la naturaleza de los hechos a partir de la razón de magnitudes. A nuestro entender, hay que buscar la explicación en que la red sismográfica empleada en el decenio de 1960, de cuando data el caso, carecía de la dotación necesaria para registrar ondas Love en los episodios de escala pequeña, ya que los enmascaraba el ruido de fondo de la tierra. Las nuevas instalaciones y métodos de tratamiento de los datos han reducido enormemente el problema. Si ocurriera una serie de temblores iguales o similares en la actualidad, creemos, se identificarían sin ambigüedad. Los sismógrafos de período largo ubicados en perforaciones, y el tratamiento digital rutinario de los sismogramas, suprimen el ruido de fondo e incrementan la detectabilidad de muchos tipos de ondas, las Love incluidas.

Como era de esperar, la incógnita tibetana se despejó, a pesar de la pobreza de los datos de período largo. En varias estaciones, el primer movimiento de las ondas *P* era hacia abajo, lo que nunca puede corresponder a una explosión. Debía tratarse, pues, de pequeños terremotos.

Parece razonable afirmar que, para las redes que describiremos más adelante, no tendrían que representar problema alguno los fenómenos de un m_b de magnitud 4 o superior. No sabemos de ningún terremoto euroasiático con una onda *P* de un segundo de magnitud 4 o superior, ocurrido en los últimos 20 años, cuyas ondas se hayan clasificado desencadenadas por una explosión. (Obviamente, muchos terremotos euroasiáticos de escala menor quedaron sin identificar por la imperfección de los datos.) Más aún, que nosotros conozcamos, ni una sola explosión nuclear subterránea de los centenares detonados durante ese mismo período radió ondas sísmicas que pudieran confundirse con las de un terremoto. Nuestra experiencia concede una probabilidad extremadamente baja a que un fenómeno quede sin identificar, si se aplican todas las técnicas de discriminción disponibles.

No hay técnica de control que ofrezca la completa seguridad de que hasta la menor de las explosiones clandestinas pueda detectarse. Suponemos que sería adecuada una capacidad de detección e identificación de fenómenos cuya magnitud sísmica equivaliera a una potencia explosiva de alrededor de un kilotón. Suele considerarse que, para que los Estados Unidos suscriban la suspensión de todas las pruebas nucleares, se requeriría un nivel de confianza del 90 por ciento de detección de cualquier violación por parte del otro firmante del acuerdo. Sin embargo, el desarrollo de una nueva arma nuclear requiere normalmente una serie de ensayos, y la probabilidad de detectar al menos alguna explosión aumenta drásticamente a medida que se incrementa el número de pruebas. Quizá tampoco sea necesario un nivel de confianza del 90 por ciento de detección de una explosión aislada. Un país que pretendiera violar el tratado tendría que considerar una probabilidad de que se detecta-

ra su explosión inferior al 30 por ciento, y seguramente mucho menor, aun si sólo planeara un ensayo clandestino. Los posibles acuerdos de prohibición puestos hasta ahora sobre el tapete incluyen una "cláusula de escape" que permite a cualquier país renunciar a las obligaciones que prevé el tratado. A menos que la probabilidad de detección fuera muy baja, un estado que, por interés nacional, decidiera reanudar las pruebas invocaría seguramente la cláusula de escape antes de arriesgarse a una denuncia por violación.

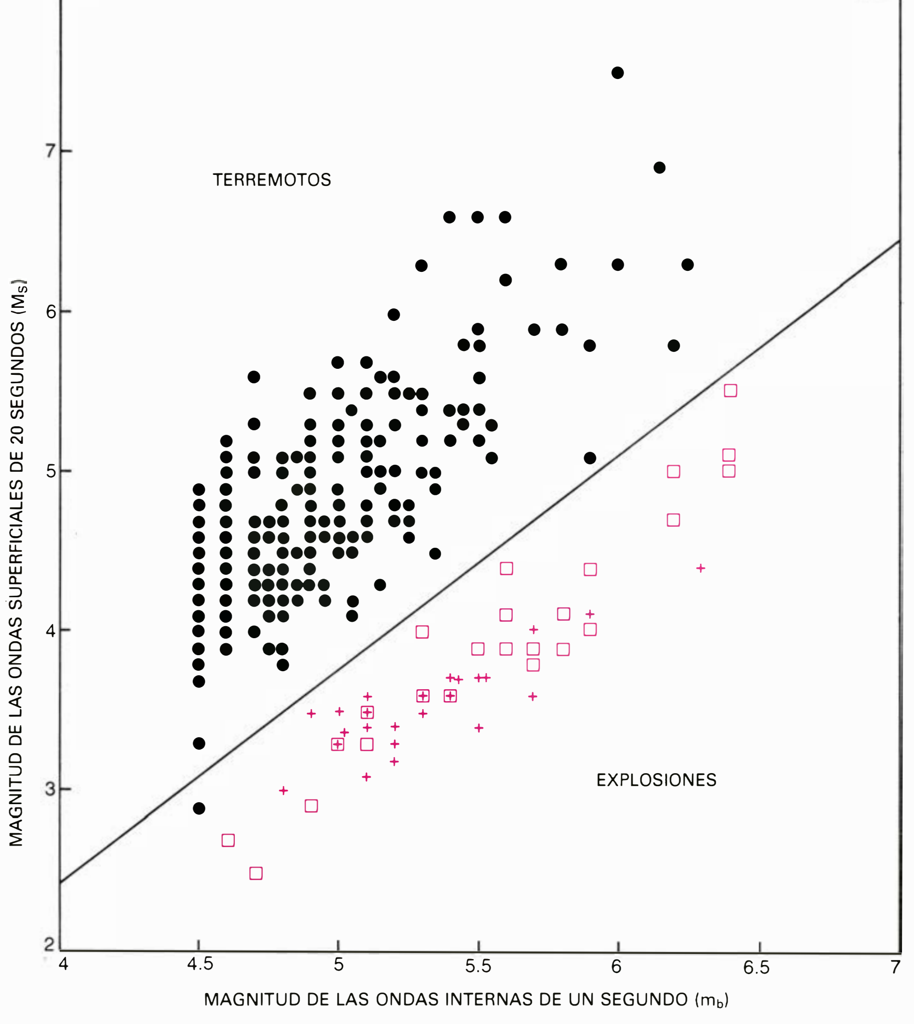
A tenor de los niveles de fiabilidad que puede alcanzar un sistema de control, podemos especificar el tamaño y la sensibilidad de la red sismográfica necesaria para verificar el cumplimiento de una suspensión ilimitada de las pruebas. Cabe considerar dos tipos de red para mantener una vigilancia sísmica de la Unión Soviética. Uno comprendería 15 estaciones situadas fuera de las fronteras de Rusia. En el segundo, esas 15 estaciones se complementarían con otras 15 tendidas por el interior.

El umbral de detección de las señales sísmicas viene impuesto por los microsismos, o vibraciones aleatorias de la superficie terrestre. La mayoría de esas sacudidas vienen inducidas por la atmósfera y los océanos. Para detectar explosiones de un kilotón en gran parte del territorio soviético, la red de control habría de poder distinguir, del ruido de fondo, cualquier fenómeno con una onda *P* de período corto de magnitud 3,8 o superior. Para separar una explosión de un terremoto mediante la comparación de la magnitud de período largo con la de período corto, la red habría de detectar ondas superficiales con una magnitud M_S de 2,5 o superior. La red exterior de 15 estaciones lo lograría. De hecho, dado que casi todas las zonas sísmicas de la Unión Soviética se sitúan a lo largo de sus fronteras, la red exterior podría captar en ese territorio episodios más débiles incluso. La mera detección de un fenómeno sísmico en la mayoría de las zonas interiores obligaría a catalogarlo entre las explosiones.

El hecho de establecer el límite inferior de un kilotón en la potencia de una explosión que pudiera detectarse con una red exterior descansa en el supuesto de que el acoplamiento entre la explosión y la radiación sísmica es eficaz y que la explosión no se produce contemporánea o inmediatamente después de un terremoto importante. Si consideramos la posibilidad de que una nación intente violar el tratado de suspensión desacoplando o amortiguando una explosión, reduciendo así la amplitud de las señales sísmicas emitidas, no habrá más remedio que mejorar la red. En principio, puede lograrse dicho amortiguamiento detonando la explosión en una gran cavidad o empleando algún material que absorba energía en una cavidad menor. La primera estratagema reduciría la señal sísmica de una explosión en 1,9 unidades de magnitud, medidas por ondas *P* de un segundo (es decir, mediante m_b). La segunda supondría una reducción de una unidad.

La utilización de una cavidad de grandes dimensiones es, sin duda, la alternativa más preocupante, pero sólo podría intentarse en ciertas formaciones geológicas: un domo salino o una potente secuencia de depósitos estratificados de sal. Pocas son las zonas de la Unión Soviética donde subyacen depósitos salinos para construir una cavidad capaz que permita desacoplar una explosión de varios kilotones. El tamaño máximo de una cavidad cuya construcción y mantenimiento sean factibles establece un límite de 10 kilotones a las explosiones que pudieran amortiguarse por este procedimiento y escaparan a la detección por la red exterior de 15 estaciones.

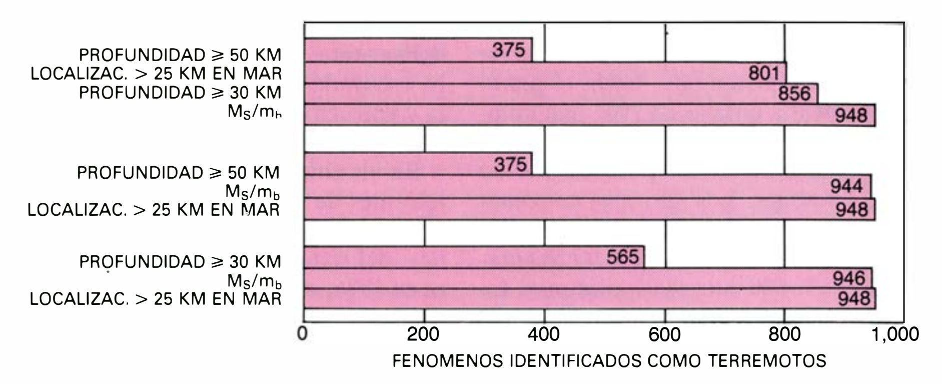
Otra forma de amortiguar la amplitud de las ondas sísmicas irradiadas es provocando la detonación en un medio de bajo acoplamiento: en un aluvión seco, por ejemplo. El espesor máximo de aluvión seco en la Unión Soviética



CLARA DISTINCION entre terremotos y explosiones por razón de la magnitud de las ondas superficiales de largo período (M_S) en función de las ondas interiores de período corto (m_b). Los 383 terremotos representados por puntos negros corresponden al conjunto de todos los episodios registrados en el mundo entero a lo largo de seis meses cuyo valor de m_b fuera igual o superior a 4,5 y cuya profundidad de foco no llegara a los 30 kilómetros. (El motivo de que aparezcan menos puntos que terremotos débese a que las magnitudes de varios de ellos coincidían.) Los cuadrados de color simbolizan las explosiones subterráneas provocadas en los Estados Unidos y, las cruces de color, las producidas en la Unión Soviética. Tan sólo un terremoto cae dentro del colectivo de las explosiones, definido por la línea recta de separación entre ambos grupos de sucesos. Dicho episodio, que ofrecía la magnitud menor de cuantos terremotos recogía el estudio, ocurrió en el sudoeste del océano Pacífico, una zona donde la sensibilidad de la red de estaciones sísmicas es más pobre que en las de la mayoría de las instaladas en el hemisferio boreal. Se han ajustado los valores m_b para introducir las variaciones regionales en la amplitud de las ondas de período corto.

establece un límite de dos kilotones a las explosiones camufladas por este método, suponiendo de nuevo que sólo se han instalado 15 estaciones exteriores.

Debe mencionarse otro posible inconveniente de la red basada exclusivamente en estaciones exteriores. Si a una misma estación llegaran simultáneamente las señales de dos o más terremotos podría originarse cierta confusión. Especial dificultad revistiría la llegada de ondas de período largo de algún fenómeno de poca magnitud, desde la Unión Soviética, junto con ondas similares de un terremoto de gran magnitud procedente de cualquier otro punto del planeta. En esas circunstancias podría resultar problemático establecer con certeza, y mediante la razón M_S/m_b, la naturaleza del fenómeno ocurrido en Rusia. Con una red de 15 estaciones exteriores habría casos, algunos por año, en los que el terremoto pequeño quedaría en territorio soviético, o hasta 25 kilómetros de sus fronteras, y a una profundidad de menos de 50 kilómetros.



COMPROBACION DE LOS METODOS empleados para distinguir entre un terremoto y una explosión. Se ensayaron aplicando dichos métodos a todos los temblores de tierra con una magnitud de 4,5 o superior que se registraron durante un intervalo de 162 días del año 1972. La muestra constaba de 948 episodios. La mayoría de ellos pudieron clasificarse como terremotos (y no como explosiones, por tanto), en virtud de su localización o su profundidad. Los restantes se discriminaron mediante comparación de la magnitud de las ondas superficiales de período largo con la magnitud de las ondas interiores de período corto (la razón M_S/m_b). Aunque, como se ve, la secuencia de aplicación de las distintas pruebas afectó al rendimiento del proceso, todos los episodios pudieron identificarse con independencia de la secuencia utilizada.

Una red de control que comprendiera 15 estaciones sismográficas fuera de la Unión Soviética y otras 15 dentro eliminaría en gran parte el problema de la coincidencia de señales de terremotos y reduciría sustancialmente la potencia a la que una explosión deja de detectarse, aun cuando se intentara desacoplarla. Las estaciones interiores de control serían sencillas y automatizadas, capaces de medir los movimientos verticales del suelo y dos componentes ortogonales del movimiento horizontal; a partir de los datos de una sola estación de corto alcance, se determinaría así la distancia y dirección de los episodios cercanos. Con semejante red, y suponiendo que se intentara el amortiguamiento aprovechando un ruido terrestre normal, la máxima explosión que llegaría al 30 por ciento de posibilidades de escapar a la detección en cualquier acondicionamiento, salvo un domo salino, sería la de 0,5 kilotones de potencia.

Por lo que respecta a los domos de sal, la zona soviética que más nos importa es la región que queda al norte del mar Caspio. Nuestra hipotética red sitúa allí tres estaciones. Pero incluso una explosión débil en una gran cavidad practicada en un domo salino emitiría ciertas ondas *P* y *S* de amplitud suficiente para detectarlas en las estaciones cercanas. Es más, la misma detección por parte de una sola estación delataría inmediatamente el carácter explosivo del episodio, ya que la zona no presenta actividad sísmica natural. En consecuencia, es poco probable que se intentara una violación de una potencia superior a un kilotón incluso en la región de domos salinos.

Una posible estratagema de violación que se ha citado de vez en cuando es la de enmascarar la señal sísmica de una explosión nuclear con la señal de un terremoto de escala elevada, que podría ocurrir por igual junto al foco de explosión o lejos del mismo. Para la Unión Soviética, la única posibilidad con visos de verosimilitud sería la del terremoto alejado, pues sólo en la península de Kamchatka y en las islas Curiles se producen esos episodios con la frecuencia suficiente para que el esfuerzo valga la pena. Y no es probable que se arriesgue allí en pruebas clandestinas, pues la zona queda exhaustivamente controlada desde estaciones ubicadas en Japón y en las islas Aleutianas. Por no mencionar los posibles sismómetros y sensores hidroacústicos de fondo oceánico a instalar cerca de la costa.

La primera defensa contra la violación por enmascaramiento de una prueba con un gran terremoto es la cuestionable viabilidad del subterfugio. A menos que el infractor dispusiera de varios puntos de ensayo, el número de oportunidades que se le presentarían cada año para acometer ensayos clandestinos sería muy bajo. Además, tendría que mantener sus armas constantemente listas para disparar. Para alcanzar la capacidad de violación que se señala más adelante habría de detonar la carga en el intervalo de los 100 segundos inmediatos tras la llegada de las ondas de período corto del terremoto. Debería estimar también la amplitud máxima y la tasa de amortiguamiento de las ondas del temblor con gran exactitud, así como prever la amplitud de las ondas *P* generadas por la explosión con una precisión de 0,1 unidades de magnitud. Aún tomando estas precauciones, el infractor tendría que aceptar una alta probabilidad de que el fenómeno lo detectara una estación de control, por lo menos, y una probabilidad menor de que lo descubrieran dos estaciones más. Debería instalar y manejar, además, su lugar de ensayo (incluida la cavidad de grandes dimensiones) y su propia red sismográfica en absoluto secreto durante años.

Frente a estas duras exigencias para una violación con éxito, los únicos requisitos que precisa el país antagonista son una red sísmica de estaciones de alta calidad y un tratamiento adecuado de los datos. Ante una red de 15 estaciones exteriores y 15 interiores que vigilan atentas, el único ardid eficaz de violación, de uno o más kilotones, requeriría a la vez desacoplar y enmascarar la señal de la explosión con un terremoto.

Las cuestiones relacionadas con el control de una prohibición absoluta de todo tipo de prueba pueden resumirse como sigue. El nivel alcanzado por la sismología y la comprobación de las redes sismográficas aseguran que el cumplimiento de un tratado se verifique con un elevado nivel de confianza. Las únicas explosiones cuya probabilidad de pasar desapercibidas valdría la pena ponderar serían las de potencia muy pequeña: menos de un kilotón si el sistema de control posee estaciones en la Unión Soviética.

Conviene abordar la cuestión de la potencia en el contexto de las armas nucleares ensayadas hasta ahora. Los tipos desarrollados en 1945, el origen

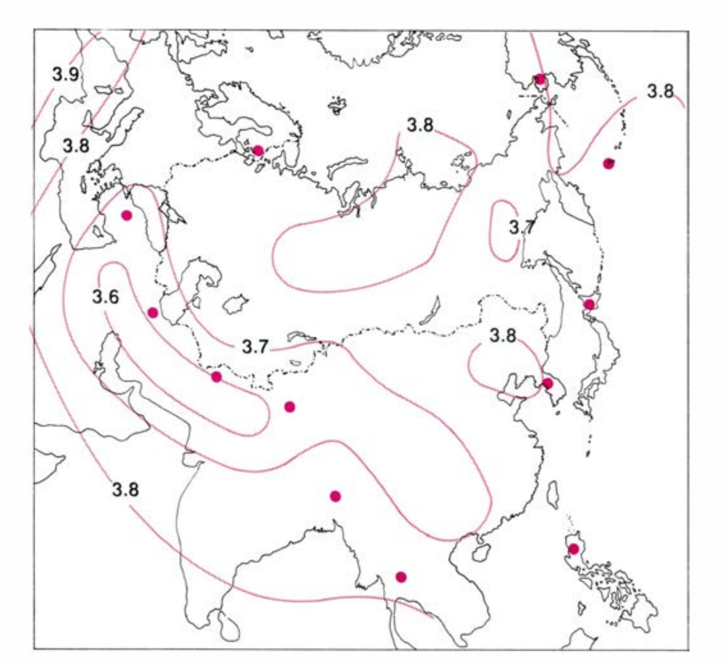
de la era nuclear, poseían una potencia de 15 a 20 kilotones. La potencia se incrementó rápidamente, hasta el punto de que Rusia ensayó en 1961 una bomba de 58.000 kilotones. La explosión subterránea de mayor potencia fue de 5000 kilotones. Los informes no sometidos a secreto oficial consideran que la potencia de los misiles intercontinentales va de los 40 a los 9000 kilotones. La potencia de las explosiones subterráneas que podrían quedar sin detectar o identificar es, por tanto, muy inferior a la de las primeras armas atómicas. Si el umbral de detección e identificación fiable es de un kilotón, ello no representa más que la 150.ª parte del límite especificado por el tratado sobre prohibición de ensayos a partir de cierto umbral, de 1976.

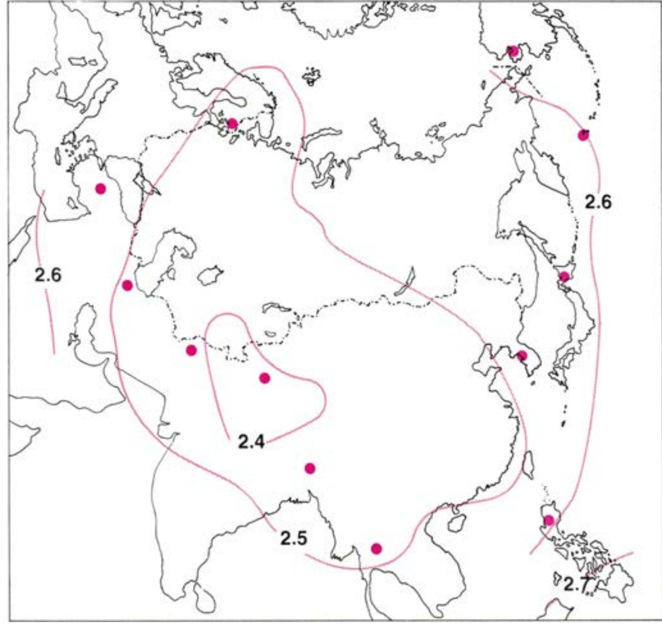
En lo que se refiere a su verificación, una prohibición irrestringida de las pruebas nucleares, para resultar eficaz, tendría que establecer un umbral muy bajo por precaución elemental de que las armas de escasa potencia podrían ensayarse ante la falta de seguridad del antagonista para detectarlas e identificarlas. El tratado debería poner el umbral cerca del límite de la capacidad de control de seísmos. La eficacia de la prohibición quedaría mejor apuntalada así que optando por un umbral excesivamente alto, el actual por ejemplo; la fuente de discordia sería la potencia exacta de los ensayos realizados en las proximidades del umbral. Indudablemente, la determinación de si se ha ensayado o no será siempre más clara y unívoca que matizar el valor exacto de la potencia probada.

En los últimos años se han divulgado informes de repetidas violaciones presumibles, por parte de la Unión Soviética, del tratado que esta nación firmara en 1976, ensayando ingenios nucleares que superaban el límite de los 150 kilotones. Se han aducido esas presuntas violaciones como razón argumental de que el tratado con limitación, no ratificado todavía por el Senado de los Estados Unidos, se escapa a una verificación fiable y, por ende, debe renegociarse. Pero si nos atenemos a nuestros propios análisis hemos de afirmar que tales informes son erróneos. Se fundan en una calibración incorrecta de una de las curvas que relacionan las magnitudes sísmicas medidas con la potencia del explosivo. Si operamos correctamente, veremos que ninguna de las pruebas soviéticas superaron los 150 kilotones, aunque varias rondaran esa cota.

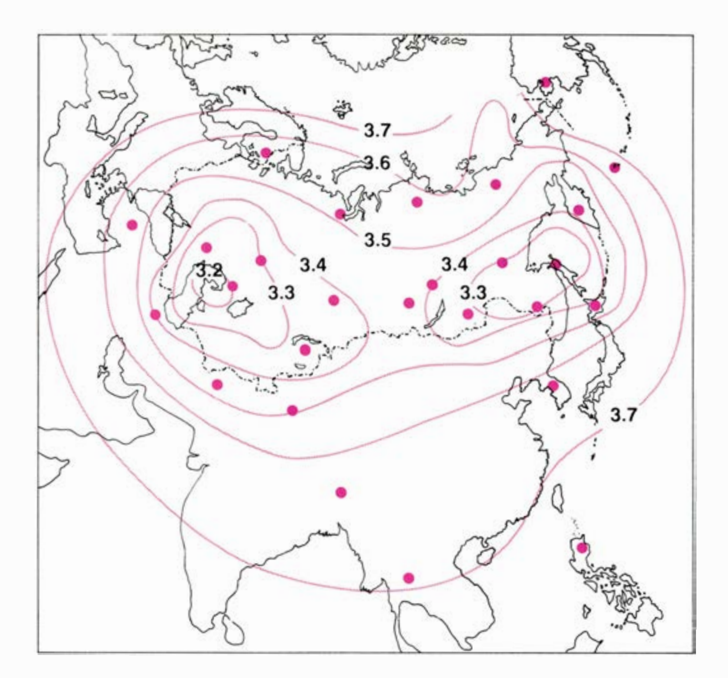
Observaciones realizadas en el polígono de pruebas de Nevada, donde tienen los Estados Unidos el banco de experimentación de su armamento nuclear, muestran que existe una correlación lineal entre el logaritmo de la potencia del explosivo y los valores de las magnitudes M_S y m_b, para las explosiones de más de 100 kilotones de potencia. Pero cuando se cotejan los valores M_S y m_b medidos en las explosiones del polígono de pruebas soviético –en las proximidades de Semipalatinsk– con las fórmulas empleadas en su homónimo norteamericano, se advierte que la potencia dada por m_b cuadriplica, por lo menos, los obtenidos con M_S. Para las explosiones en roca dura, en distintos polígonos de pruebas, los valores que se estiman de la potencia a partir de la fórmula M_S norteamericana concuerdan invariablemente con las potencias reales, mientras que los cálculos fundados en la fórmula m_b estadounidense ofrecen, con frecuencia, un llamativo desacuerdo con la potencia real.

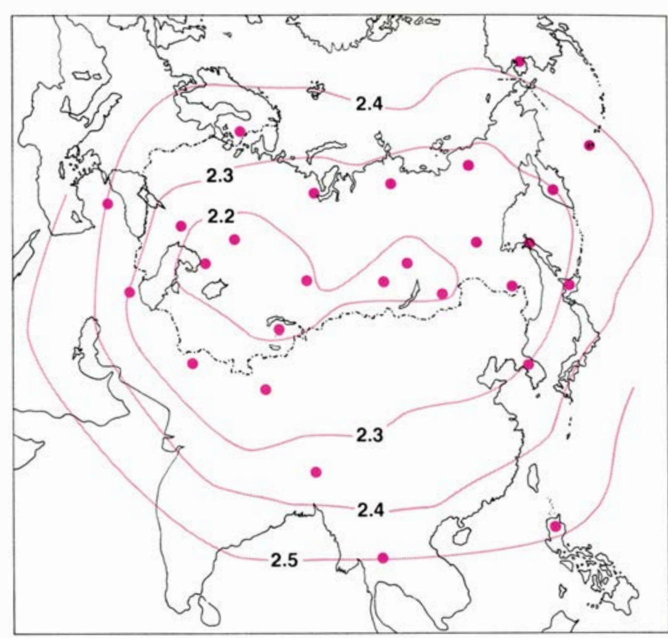
Se ha observado una estrecha correlación entre los valores de m_b medidos en distintas estaciones y los tiempos invertidos por las ondas *P* hasta llegar a las mismas. La Unión Soviética publica periódicamente boletines sismológicos que recogen tiempos de llegada de ondas *P* procedentes de terremotos; y es quehacer de mero cálculo determinar los tiempos de llegada a las estaciones de Asia Central en términos de la pauta que presentarán los valores de m_b en las inmediaciones de Semipalatinsk. Del análisis de las señales de las ondas *P* podemos inferir que los valores de m_b, para una explosión provocada en Semipalatinsk, serán, en 0,4 unidades, mayores que los que asignaremos a una explosión pareja que se experimente en Nevada. Se trata de la

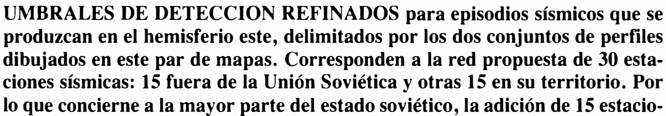




UMBRALES DE DETECCION de los seísmos que se producen en el hemisferio norte delimitados por las dos series de perfiles dibujadas en este par de mapas. Corresponden a la red propuesta de 15 estaciones sísmicas establecidas fuera de la frontera soviética. Los puntos de color señalan la ubicación de 12 de las 15 estaciones en cuestión; tres quedan fuera del mapa. El número de cada perfil representa que un episodio de esa magnitud, o más intenso, tiene una probabilidad mínima del 90 por ciento de que lo detecten cuatro o más estaciones. Los perfiles del mapa de la izquierda definen los umbrales de detección para las ondas internas de período corto y, los del mapa de la derecha, los umbrales de detección para las ondas superficiales de período largo. En esos mapas y en los de la figura siguiente el único ruido sísmico introducido es el que causan los microseísmos generados por la atmósfera y los océanos.







UMBRALES DE DETECCION REFINADOS para episodios sísmicos que se produzcan en el hemisferio este, delimitados por los dos conjuntos de perfiles dibujados en este par de mapas. Corresponden a la red propuesta de 30 estaciones sísmicas: 15 fuera de la Unión Soviética y otras 15 en su territorio. Por lo que concierne a la mayor parte del estado soviético, la adición de 15 estaciones interiores supondría rebajar el umbral de detección de las ondas interiores de período corto desde la magnitud de 3,8 hasta la de 3,4 (*izquierda*). El efecto para las ondas superficiales de largo período significaría rebajar el umbral desde una magnitud de 2,6 hasta otra de 2,3 (*derecha*). Las estaciones interiores podrían suministrar también información más precisa del foco.

misma corrección que hemos de aplicar a la curva que relaciona m_b con la potencia en el polígono de Nevada y hacer así que los cálculos de la potencia de las explosiones soviéticas sean coherentes con los cálculos de M_S. Dos tipos de análisis distintos nos han llevado, pues, a la conclusión de que existe una relación universal entre M_S y la potencia, en tanto que resulta obligado calibrar, para cada polígono de pruebas, la curva que relaciona m_b con la potencia.

Un tratado ilimitado e incondicional ofrecería una nueva ventaja sobre el que se firmara ateniéndose a los umbrales bajos: todas las dudas técnicas laborarían contra el posible infractor. La nación que proyectara una prueba nuclear clandestina desconocería la capacidad exacta de detección de seísmos en manos de los otros países, ni sabría la magnitud precisa de las ondas sísmicas que desencadenaría su ensayo. Y habría, además, una razón política de peso: la prohibición incondicional de cualquier explosión nuclear llevaría aparejada la idea de que las armas nucleares, sin consideraciones de potencia, aparecerían como grupo distinto del armamento convencional.

No está de más reflexionar cuán distinta sería la historia reciente y la situación actual del mundo si en 1963 se hubiera logrado un acuerdo sobre prohibición absoluta de cualquier prueba. Los arsenales militares han crecido vertiginosamente desde entonces, y se estima hoy que hay de 50.000 a 100.000 cabezas nucleares. Las pérdidas de vidas humanas y el daño social que causaría un conflicto de grandes proporciones serían inmensamente mayores que el que suponía la situación de 1963. Nunca se han sentido los Estados Unidos y Rusia tan inseguros como en nuestros días, y no precisamente por una incapacidad de desarrollar la industria armamentística; antes bien, por culpa de los arsenales nucleares en continua expansión y por la imposibilidad en que se encontraría cualquier nación de hacer frente a un ataque nuclear.

El acuerdo sobre la prohibición absoluta de pruebas no debe entenderse como sustituto del desarme. Una reducción eficaz de la amenaza nuclear ha de comprender un proceso serio e incesante de control de armas nucleares. De cuyo desarrollo el tratado sobre prohibición absoluta constituiría una parte importante. Pero los problemas implicados en la negociación de un acuerdo semejante son de orden político, más que técnico, y como tales han de abordarse.

Antes de la suspensión de las negociaciones entre Estados Unidos, Inglaterra y la Unión Soviética, en 1980, se había alcanzado un acuerdo provisional sobre varios puntos. Admitían las tres naciones que un tratado de prohibición debería rechazar todo tipo de pruebas en cualquier medio, se adoptaría una moratoria para las explosiones nucleares de uso pacífico hasta que se hubieran discutido y acordado las bases de permisión, se estipularían las previsiones para la inspección in situ y se reglamentaría el mecanismo de un intercambio internacional de datos sísmicos e instalación de estaciones sísmicas a prueba de cualquier manipulación torcida por cada país en el territorio de los demás. El tratado tendría una duración de tres años, se preveía. Los acuerdos sobre inspección in situ, explosiones con fines pacíficos e instalaciones de control suponían importantes avances. Sería un penoso retroceso para la causa de la seguridad internacional que estos logros, duramente ganados, se echaran ahora a perder.

Durante muchos años, la política oficial de los Estados Unidos ha insistido en la necesidad de una prohibición sin recortes de las pruebas nucleares, siempre que estuviera asegurada su verificación. La política no ha cambiado de signo, en lo fundamental, por la decisión reciente de la administración Reagan de posponer nuevas negociaciones sobre la prohibición de pruebas nucleares. Todo lo contrario. Se ha informado que el gabinete apoya todavía el objetivo último del rechazo absoluto de cualquier ensayo, aunque manifiesta sus dudas de la eficacia y fiabilidad de los métodos de verificación. Como hemos intentado demostrar aquí, no hay razones para tales recelos.

Calcio y transmisión sináptica

Un flujo de iones calcio desencadena la transmisión de señales de una célula nerviosa a otra. Se estudia el proceso en una sinapsis (contacto interneural) cuyo tamaño es varios cientos de veces superior al común

Rodolfo R. Llinás

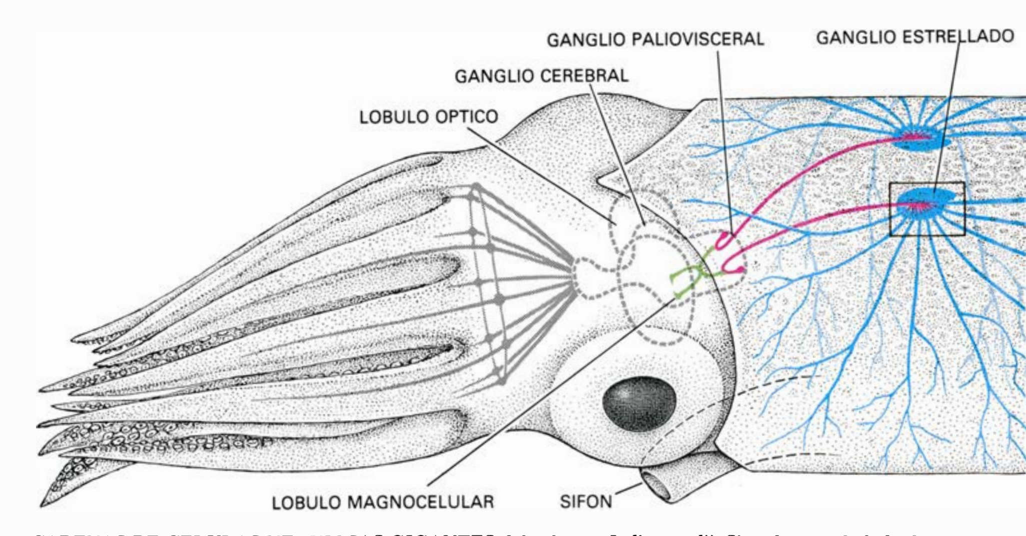
Las sinapsis constituyen los centros de contacto que las células nerviosas, o neuronas, poseen para comunicarse entre sí. A lo largo de las primeras etapas de la vida del organismo desempeñan un importante papel en el desarrollo del sistema nervioso. (Las sinapsis se forman en los extremos distales de las fibras que parten del cuerpo de la neurona.) Parece verosímil que gran parte de la capacidad del cerebro para regenerarse de una lesión y, en buena medida, la capacidad de aprendizaje, puedan explicarse, en última instancia, a través del funcionamiento de las sinapsis. No sólo eso. Resulta cada vez más claro que la mayoría de las enfermedades del cerebro y muchas alteraciones psiquiátricas derivan de trastornos de la comunicación sináptica, o están asociadas a los mismos. La sinapsis es el eslabón más débil en la actividad cerebral: el eslabón de la cadena de transmisión neural que antes se fatiga cuando por ella pasan muchos mensajes. Constituye, también, el centro de acción de la mayoría de las drogas que afectan al cerebro; entre ellas, las que producen adicción o las de uso terapéutico, desde la aspirina hasta los barbitúricos. Por todas esas razones, desentrañar los mecanismos implicados en la transmisión sináptica resulta fundamental para entender cómo funciona el cerebro y cuáles sean las causas de sus trastornos.

En este artículo vamos a insistir, sobre todo, en un aspecto de la transmisión, el denominado acoplamiento de despolarización-secreción. En la transmisión sináptica, una neurona (la célula presináptica) libera una sustancia biológicamente activa (un neurotransmisor) que provoca una respuesta excitadora o inhibidora en una segunda neurona (la célula postsináptica). La liberación del transmisor consiste esencialmente en un proceso de secreción, fenómeno éste compartido por otras células en el curso de la evolución. En la inmensa mayoría de los casos conocidos, la secreción se realiza por exocitosis: mecanismo a través del cual unos sacos membranosos, o vesículas, que se forman en el interior de la célula, se fusionan con la membrana plasmática. Por mor de la fusión, las vesículas vierten su contenido en el medio extracelular.

Las neuronas liberan sus neurotransmisores de acuerdo con ese patrón. Se sabe que la liberación se estimula al producirse una pérdida de la polarización eléctrica de la membrana de la neurona presináptica a nivel de la sinapsis. La etapa del proceso de transmisión sináptica que nos interesa aquí puede destacarse en el siguiente interrogante: ¿A través de qué mecanismo conduce la despolarización de la membrana a la liberación de neurotransmisor, de modo que, en un circuito neuronal, una neurona transmita señales a su inmediata? Se ha demostrado que la relación entre la actividad eléctrica de la célula y la liberación de neurotransmisor no es directa, sino que se produce a través de un intermediario, el ion calcio.

Cuando una neurona está en reposo existe un potencial eléctrico, o diferencia de voltaje, de unos 70 milivolt entre el interior y el exterior celular. El potencial es negativo en el interior; y así se afirma que la membrana celular tiene una polarización de −70 milivolt. Cuando la membrana se despolariza, la diferencia de potencial disminuye. Si la despolarización es suficientemente grande, se produce un potencial de acción que alcanza un valor de + 10 a + 30 milivolt, invirtiendo así la polaridad del potencial de membrana. La inversión dura apenas un milisegundo.

El mecanismo específico que origina la despolarización no condiciona la liberación subsiguiente de neurotransmisor. En los receptores sensoriales, que responden a estímulos que actúan directamente sobre su superficie (sonido o tacto), la despolarización se produce por la energía del estímulo. En tales



CADENAS DE CELULAS NERVIOSAS GIGANTES del calamar *Loligo pealii*. Situadas a cada lado de la línea media, se aprecia en ambas una sinapsis gigante, un sitio de contacto entre dos células nerviosas para la transmisión de mensajes. Su tamaño, 0,7 milímetros de longitud, equivale a varios centenares de veces el tamaño de una sinapsis típica. Tamaña magnitud permite la implantación de varios microelectrodos a través de la membrana, sin que se perturbe la transmisión de señales mientras se registra o modifica experimentalmente su potencial, es decir, su voltaje. La cadena nerviosa que contiene la sinapsis se muestra aquí en color. La primera célula, la neurona gigante de primer orden (*verde*), se encuentra en el

neuronas, la despolarización puede consistir en un ligero cambio de potencial que persista varios segundos. En las neuronas del cerebro, la despolarización ocurre generalmente como consecuencia de los mensajes que la célula recibe a través de las sinapsis con otras neuronas. En este último caso, la despolarización consiste en una rápida variación de potencial que dura escasos milisegundos. Si dicha variación adquiere cierta magnitud, la célula generará su propio potencial de acción. En todo caso, el efecto de la onda de despolarización que llega a la membrana de la terminación presináptica es siempre el mismo: determinar la liberación de transmisor.

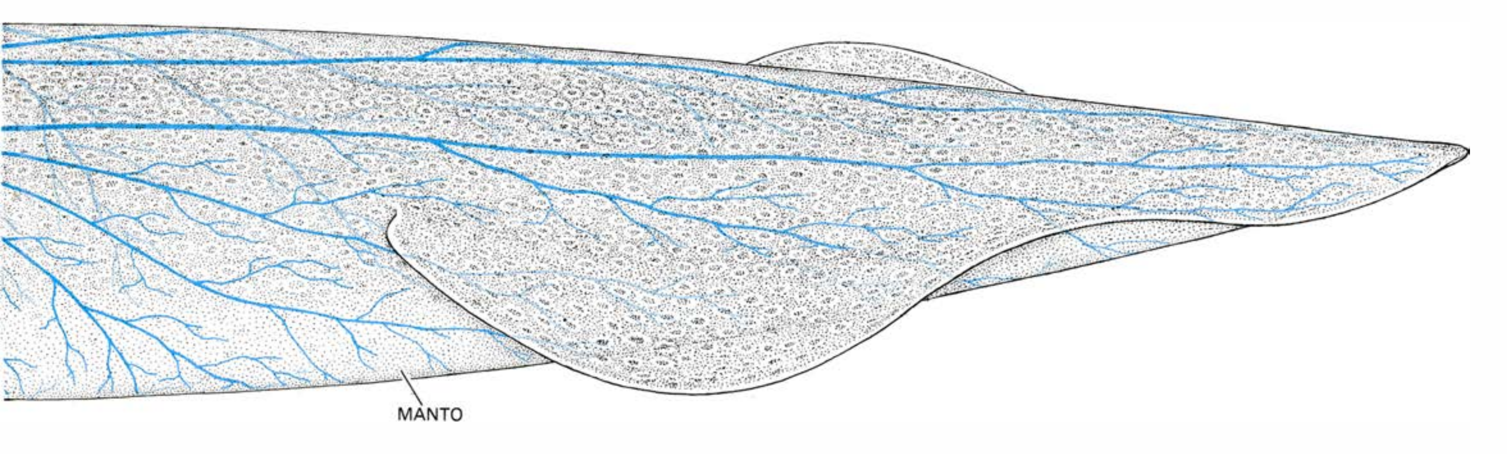
La despolarización no basta por sí misma para producir la liberación de transmisor. Se requiere, además, la presencia de iones calcio en el medio extracelular. La despolarización parece ser el mecanismo a través del cual se induce un flujo de iones calcio hacia el interior de la terminación presináptica. También en este aspecto la transmisión sináptica se asemeja a otros procesos secretores. Y en todos los procesos secretores estudiados el aumento de la concentración de calcio en el interior de la célula secretora desencadena la secreción. Débese dicho incremento a la entrada de calcio desde el medio extracelular o a la liberación del calcio almacenado en el interior de la célula. Parece plausible que, en las neuronas, la entrada de iones calcio determine la fusión de ciertas vesículas intracelulares (vesículas sinápticas) con la membrana presináptica. Las vesículas, llenas de sustancia transmisora, se acumulan en la proximidad de la cara interna de la membrana, en el punto de liberación del neurotransmisor.

Entre las dificultades que plantea la investigación de los mecanismos implicados en la transmisión sináptica, una de ellas resulta crucial: las sinapsis son diminutas. Hasta ahora, el único método experimental que se muestra rápido y preciso en este dominio de la investigación es el registro de la actividad eléctrica. El diámetro de la terminación presináptica en la mayoría de los vertebrados e invertebrados mide sólo de 0,1 a cinco micrometros. El microelectrodo idóneo para registrar la actividad eléctrica de la terminación sináptica posee un diámetro de unos 0,5 micrometros. Se comprende, pues, que introducir un electrodo en la terminación presináptica sin dañarla sea tarea muy difícil, como lo es mantenerlo en su emplazamiento durante el experimento.

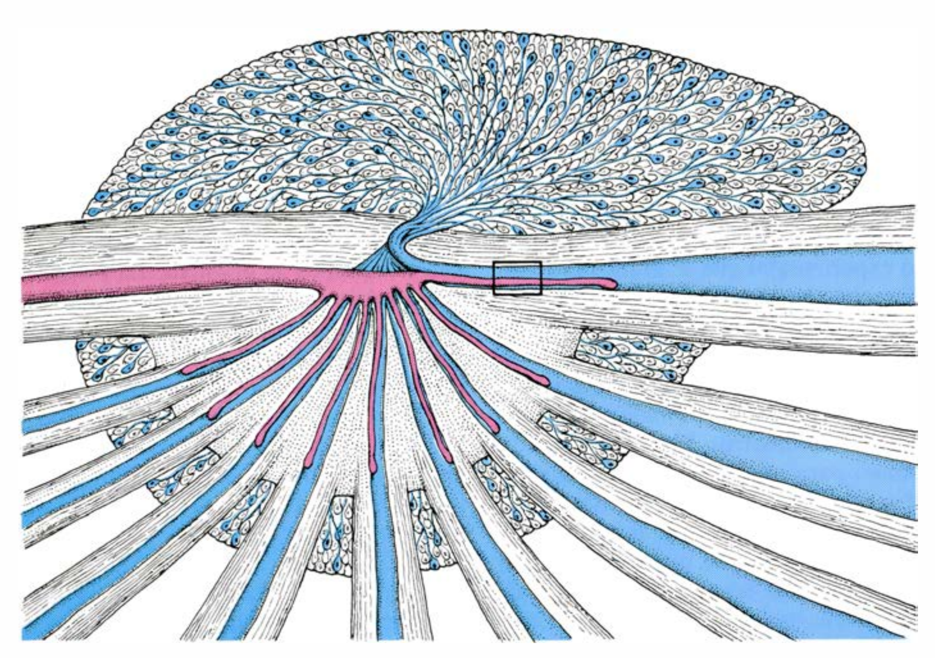
Afortunadamente para el neurólogo, hay sinápsis que superan con mucho el tamaño medio. Entre ellas cabe citar las sinapsis observadas en ciertos ganglios (grupos de neuronas) de moluscos y crustáceos, y las sinapsis existentes entre las denominadas células de Mauthner, del tronco cerebral de los peces y algunos anfibios. Las células de Mauthner controlan el movimiento de la cola. De las mayores sinapsis destacaríamos la sinapsis gigante del calamar, que alcanza los 700 micrometros. Su tamaño y accesibilidad la han convertido en la fuente principal de nuestros conocimientos sobre la relación que guardan la despolarización y la liberación de neurotransmisor.

La presencia de la sinapsis gigante en el calamar fue descubierta en 1935 por J. Z. Young, de la Asociación de Biología Marina de Gran Bretaña en Plymouth. La sinapsis aparecía en la descripción que hizo de una cadena de neuronas gigantes del calamar, constituida por tres axones o fibras nerviosas y los cuerpos neuronales a partir de los cuales aquellos se originan. La magnitud del diámetro de los axones indujo a más de uno a confundirlos con vasos sanguíneos; Young los identificó como tejido nervioso por su capacidad para conducir un potencial de acción. Las cadenas neuronales existentes a cada lado del cuerpo del calamar controlan las respuestas del animal en su huida o en la captura de presas.

La primera célula nerviosa de la cadena se denomina neurona gigante de primer orden. Se ubica en el lóbulo magnocelular, un conjunto de células de lo que viene a ser el cerebro del animal. Su cuerpo celular mide unos 150 micrometros de diámetro, un tamaño muchas veces superior a la mayor célula nerviosa del cerebro humano. Con su extensa red de dendritas (extensiones tubulares del cuerpo celular) su longitud alcanza los 800 micrometros. A través de éstas reúne señales originadas en puntos diversos: los ojos, los órganos vestibulares y los tentáculos. Se trata, en efecto, de un ordenador compuesto por una sola célula que informa al animal de las situaciones de peligro. Los resultados de sus cálculos se transmiten a lo largo de la membrana del axón. Para asegurar la sincronía en la transmisión de tales mensajes, los axones de las neuronas gigantes de primer



lóbulo magnocelular, que ocupa la mayor parte de lo que puede entenderse como el cerebro del animal. La neurona recoge datos sensoriales procedentes de los ojos y los tentáculos y los transmite, a través del axón (fibra nerviosa), hasta el ganglio paliovisceral. En éste, el axón establece contacto sináptico con el axón de una segunda célula de la cadena, la neurona gigante de segundo orden (*rojo*). En el ganglio estrellado, situado en el flanco del manto del animal, el axón de segundo orden contacta sinápticamente con un conjunto de axones de tercer orden (*azul*), que desencadenan la contracción del manto. La contracción propulsa agua a través del sifón, impulsando al animal en su huida del peligro. La sinapsis gigante que forman el axón de segundo orden y el axón de tercer orden de mayor tamaño, el que pasa próximo a la línea media en la parte dorsal del manto, es la que han estudiado el autor y sus colegas. El ganglio estrellado del lado izquierdo (enmarcado aquí en un rectángulo) se amplía en la ilustración superior de la página siguiente.



EN EL GANGLIO ESTRELLADO, el axón de segundo orden (*rojo*) se ramifica en una serie de expansiones digitiformes. Cada una constituye una terminación presináptica que establece contactos sinápticos con un axón de tercer orden (*azul*), resultante de la fusión de los axones proyectados por varios centenares de neuronas ganglionares. El axón de tercer orden, de mayor tamaño, que abandona el ganglio y se dirige a la derecha procedente de un haz de axones más pequeños, forma la parte postsináptica de la sinapsis gigante. Más allá de la sinapsis, el axón se ensancha hasta los 0,5 milímetros, centuplicando así el diámetro de un axón típico. La zona de la sinapsis gigante enmarcada por el rectángulo se representa abajo.

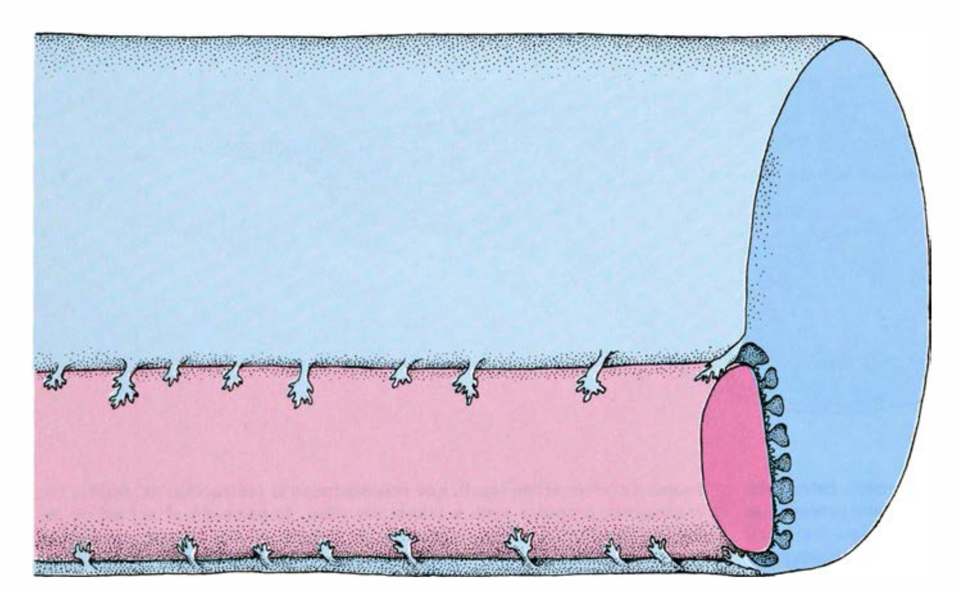
orden de cada lado del animal aparecen fundidas a lo largo de un corto trecho, en la línea media.

La segunda célula de la cadena, la neurona gigante de segundo orden, se encuentra en el ganglio paliovisceral, detrás del lóbulo magnocelular. La célula en cuestión posee un diámetro de 100 micrometros. Su axón se curva a través del ganglio siguiendo una trayectoria que lo dirige hacia el manto del calamar. En la curva entra en contacto con el axón de la neurona gigante de primer orden, estableciendo sinapsis con ella. El axón de segundo orden se encamina entonces hacia el centro del ganglio estrellado, que se halla en la superficie interna del manto. En ese punto se ensancha y se divide en una serie de ocho o 10 ramificaciones terminales, que recuerdan la disposición de los dedos de la mano. Las ramas varían en tamaño. Las más finas poseen un diámetro de 25 micrometros; las más gruesas doblan ese valor.

La tercera célula de la cadena es en realidad un conjunto formado por centenares de células; el diámetro de cada elemento de ese conjunto se halla entorno a los 50 micrometros. Las células se organizan para formar ocho o diez grupos. Cada grupo produce un axón gigante final por fusión de los axones individuales. Del ganglio estrellado, pues, parten de ocho a 10 axones gigantes. El más delgado tiene un diámetro de unos 50 micrometros y recibe señales a través de una sinapsis con la terminación más delgada de las ramificaciones del axón de segundo orden; luego se ensancha y abandona el ganglio estrellado para inervar el tejido muscular del manto próximo al ganglio. El más grueso de los axones de tercer orden mide unos 200 micrometros de diámetro y recibe señales a través de una sinapsis con la más gruesa de las ramificaciones terminales del axón de segundo orden; ulteriormente se ensancha, alcanzando un diámetro de unos 500 micrometros, y se apresta a inervar el tejido muscular situado en la parte más distante del manto. El resto de los axones de tercer orden tienen destinos intermedios.

A partir de su estructura podemos inferir las grandes líneas del funcionamiento de esta red. Cuando los estímulos que alcanzan la neurona de primer orden traspasan cierto umbral, el de alarma, la célula activa el axón de segundo orden; éste produce, a su vez, una excitación sincrónica en todos los axones de tercer orden. La velocidad de propagación de la onda de despolarización a lo largo de la fibra nerviosa depende del diámetro de dicha fibra. Puesto que los axones de tercer orden de mayor longitud son también los de mayor diámetro, se mantiene la sincronización de todas las señales, y todos los músculos del manto se contraen simultáneamente. La contracción fuerza al agua contenida en el manto a salir a través del sifón próximo a la cabeza del animal. El animal escapa del peligro impulsado por propulsión a chorro.

La sinapsis gigante que hemos sometido a estudio es la que aparece entre el axón de segundo orden y el mayor axón de tercer orden. Al examinar en detalle dicha sinapsis se observa que la membrana de la terminación presináptica (axón de segundo orden) es lisa. Por el contrario, la membrana de la terminación postsináptica (el axón de tercer orden) posee múltiples ramificaciones que se subdividen repetidamente y terminan en una red de prolongaciones espiniforme. En la sinapsis gigante se cuentan hasta 5000 prolongaciones de ese tipo, en contacto con la membrana presináptica. Tal estructura es poco usual. En una sinapsis típica, el extremo postsináptico es liso, mientras el presináptico muestra una serie de pro-

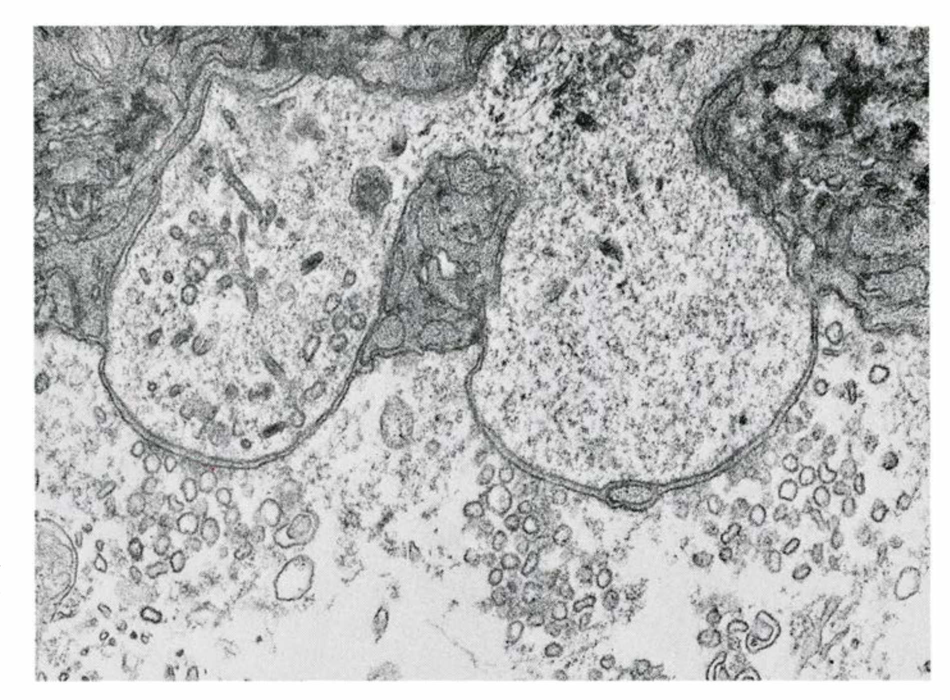


SINAPSIS GIGANTE constituida por dos membranas yuxtapuestas. La membrana postsináptica del axón de tercer orden posee unas 5000 extensiones espiculares orientadas hacia la membrana presináptica.

tuberancias al final del axón, denominadas botones sinápticos.

No obstante, el examen microscópico de las terminaciones presinápticas de la sinapsis gigante muestra la morfología típica de dichas estructuras. En el interior de la terminación presináptica se observan vesículas y otros dos orgánulos que suelen abundar en las sinapsis: mitocondrias, que producen la energía de que dispone la célula, y un sistema de subcisternas formado por pliegues de membrana intracelular cuya función desconocemos. En esas mismas zonas, la membrana postsináptica aparece engrosada, lo que, en las sinapsis típicas, corresponde a asentamientos de receptores: moléculas ancladas en la membrana postsináptica que interaccionan con las moléculas de neurotransmisor que llegan a ella.

En la sinapsis gigante del calamar se obtuvo por primera vez una prueba directa de que la transmisión de un mensaje neural a través de la sinapsis requería la liberación de una sustancia transmisora. Esta mediación química, que se había postulado en el curso de investigaciones realizadas sobre la unión entre nervios y músculo, quedó patente en la década de 1950, y comienzos de los años 60, en una serie de trabajos llevados a cabo por Theodore H. Bullock, Susumu Hagiwara, Ichiji Tasaki, Noriko y Akira Takeuchi, Ricardo Miledi y C. R. Slater. Los estudios pudieron realizarse gracias al tamaño de la sinapsis gigante. En efecto, los investigadores mencionados colocaron el extremo de un microelectrodo en la terminación presináptica y el extremo de un segundo microelectrodo en el axón postsináptico, de modo que pudiera registrarse la diferencia de potencial entre ambas membranas sinápticas. Podían, además, modificarse las concentraciones iónicas, o de otras sustancias, en la disolución que bañaba la sinapsis (que iba unida a varios centímetros de los axones de segundo y tercer orden). Se estudió así la influencia de los iones y la acción de determinadas drogas.



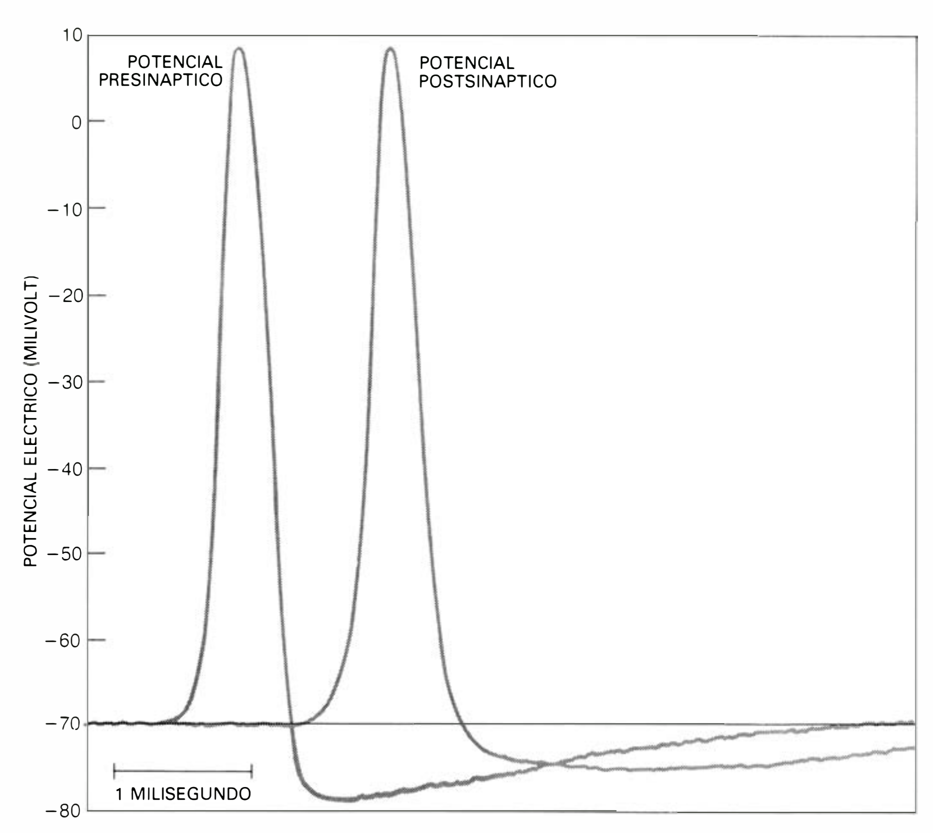
MICROGRAFIA ELECTRONICA de la sinapsis gigante, que sugiere cómo se transmiten las señales. La terminación presináptica se encuentra en la parte inferior de la figura; sobre ella se apoyan dos protuberancias bulbosas que se proyectan a partir de una extensión espicular única del axón postsináptico. En el interior de la terminación presináptica, en la región en la que se apoyan las protuberancias, se aprecia un acúmulo de orgánulos en forma de saco. Se trata de vesículas sinápticas, en cuyo interior se almacena un neurotransmisor, una sustancia liberada en la terminación presináptica que actúa sobre la membrana postsináptica. La transmisión consiste, pues, en un proceso de secreción. La micrografía electrónica representa una ampliación de 74.000 diámetros y fue realizada por David W. Pumplin, de la Universidad de Maryland en Baltimore, y por Thomas S. Reese, del Instituto Nacional de Enfermedades Neurológicas.

De los estudios realizados se dedujo que, cuando un potencial de acción se propagaba a lo largo de los axones de segundo orden y alcanzaba la terminal presináptica, se producía, tras un período de latencia de alrededor de un milisegundo, la despolarización del axón postsináptico. En cambio, un potencial de acción en la terminación postsináptica (inducido por la estimulación eléctrica del axón de tercer orden) no incidía en la terminación presináptica. Se demostró ulteriormente que el grado de despolarización postsináptica aumentaba con la amplitud y la duración del potencial de acción presináptico. Sin embargo, no había despolarización postsináptica si se eliminaba el calcio de la disolución que bañaba la sinapsis. La combinación de todas estas observaciones, que mostraban, entre otras cosas, una demora sináptica y el carácter unidireccional de la propagación, ponía de manifiesto que los mensajes neurales no se transmitían eléctricamente a través de la sinapsis gigante; se requería un mensajero químico.

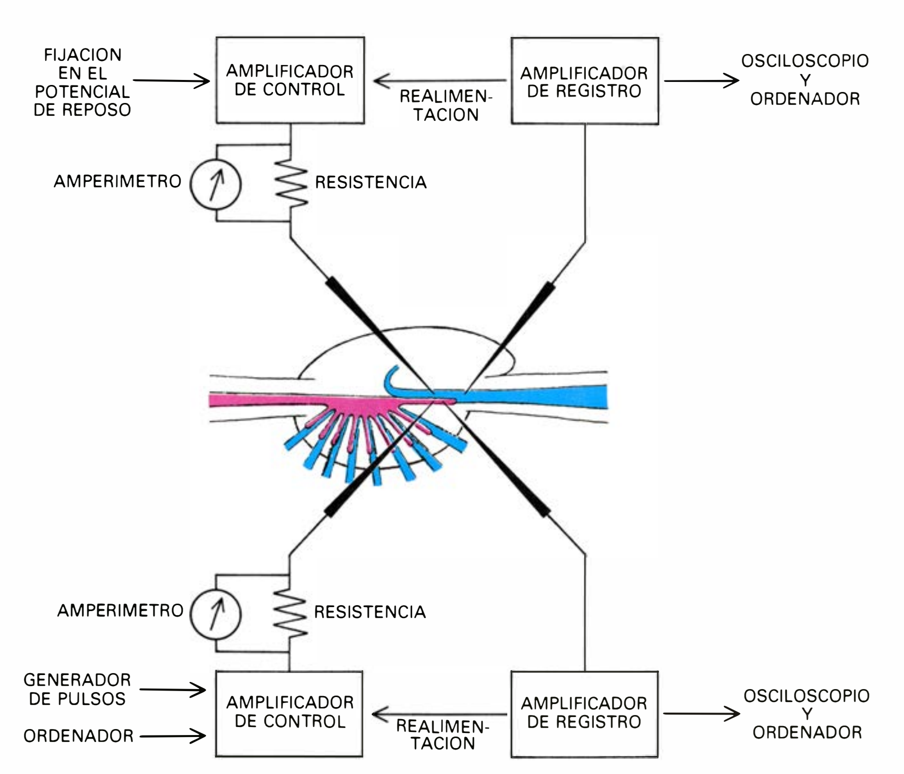
En 1966, Bernard Katz y Miledi, del Centro de Investigación Zoológica de Nápoles, y dos grupos del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, Massachusetts, uno formado por Kiyoshi Kusano, D. R. Livengood y Robert Werman y, el otro, por James R. Bloedel, Peter W. Gage, David M. J. Quastel y el autor, realizaron un nuevo descubrimiento. La transmisión de mensajes a través de la sinapsis gigante no requería la llegada de un potencial de acción presináptico. Bastaba con que la terminación presináptica se despolarizara, lo que podía conseguirse no sólo después de actuar un potencial de acción, sino haciendo pasar también una corriente eléctrica a través de un microelectrodo implantado en la terminación. El descubrimiento encerraba su interés: separaba el mecanismo de la excitabilidad eléctrica responsable del potencial de acción del mecanismo causante de la liberación de transmisor en la terminación presináptica.

La cantidad de transmisor liberado en la terminación presináptica después de una estimulación artificial dependía, de forma curiosa, del grado de despolarización presináptica. Una pequeña despolarización de la membrana presináptica producía una ligera despolarización postsináptica, de lo que se deducía que en la terminación presináptica se había liberado una cantidad relativamente pequeña de transmisor. Una despolarización presináptica mayor instaba una respuesta más intensa, pero ello ocurría sólo hasta un cierto valor, pues la respuesta disminuía si la despolarización presináptica superaba en más de 60 milivolt sobre el potencial de reposo de −70 milivolt, esto es, si el potencial presináptico alcanzaba un valor más positivo que −10 milivolt. De hecho, si la despolarización presináptica era suficientemente grande, de suerte que el potencial presináptico resultase mayor de +100 milivolt, desaparecía la respuesta postsináptica. Mas, incluso en este caso, se detectaba una breve transmisión sináptica al final del pulso experimental, cuando el potencial presináptico tornaba a su valor de reposo.

Estas observaciones se interpretaron



ACTIVIDAD ELECTRICA NORMAL de una sinapsis gigante, que muestra las mismas características que las sinapsis de todos los animales. Cuando el potencial eléctrico a través de la membrana de la terminación presináptica se aparta de su valor de reposo de −70 milivolt por la presencia de un potencial de acción, que se transmite a lo largo del axón de segundo orden, la terminación presináptica libera neurotransmisor. La llegada del transmisor a la terminación postsináptica altera la permeabilidad iónica de la membrana postsináptica. La corriente iónica que se establece entonces a través de la membrana estimula la terminación postsináptica y provoca la aparición del potencial de acción postsináptico.

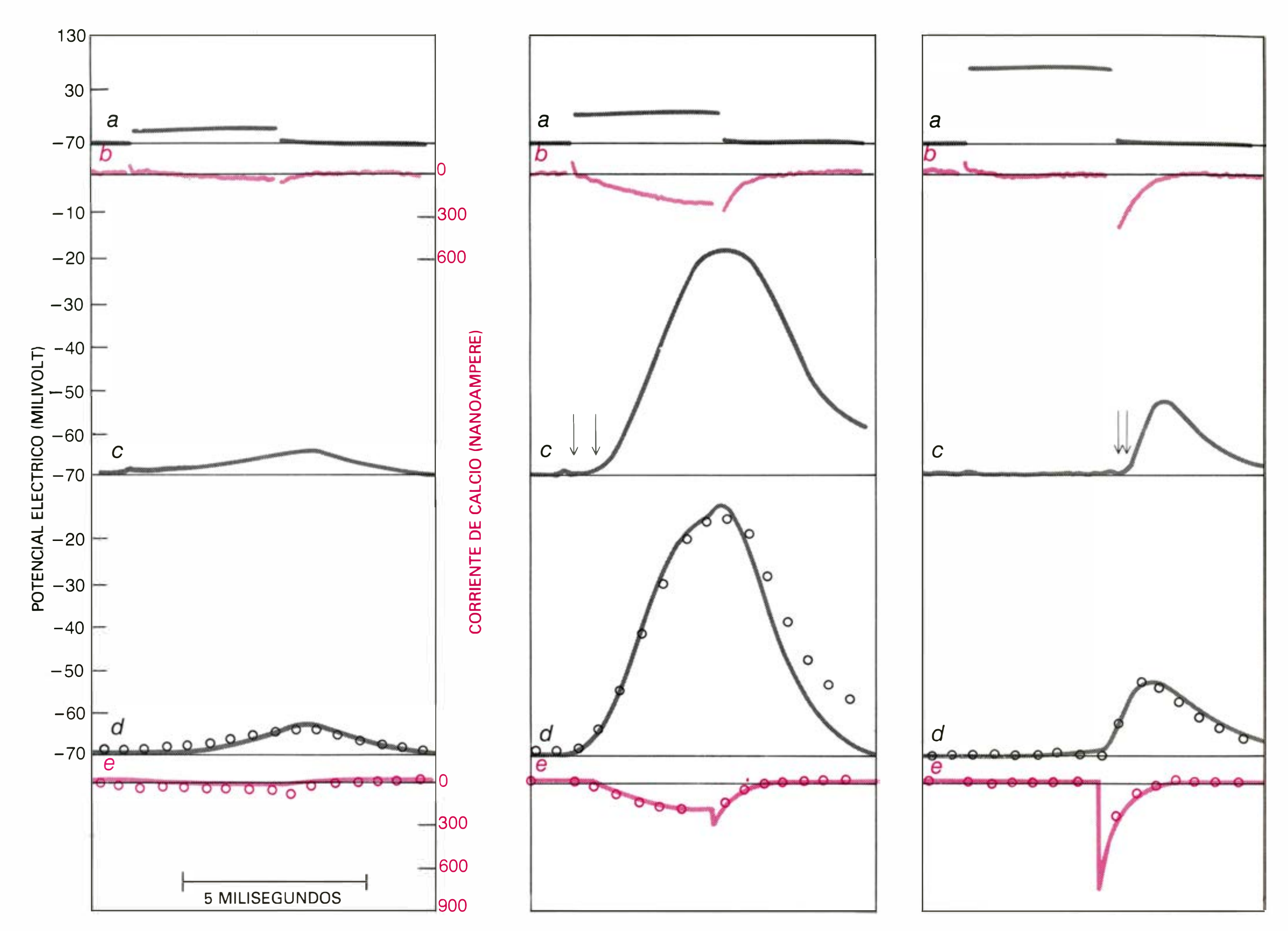


CIRCUITO DE VOLTAJE-FIJO, que impone un patrón predeterminado de voltaje en la terminación presináptica, en la postsináptica o en ambas. Un microelectrodo registra el voltaje a través de la membrana de la terminación presináptica. Sus mediciones realimentan un segundo microelectrodo, que aplica corriente en la terminación. Los instrumentos de medida determinan la intensidad de corriente que debe aplicarse para proporcionar a la terminación un voltaje fijo, establecido por un generador de pulsos o un ordenador. Por un procedimiento similar se fija la terminación postsináptica a su potencial de reposo.

en base a los efectos de la despolarización sobre el flujo de iones calcio. Cuando la neurona se encuentra en estado de reposo, la membrana resulta impermeable a los iones calcio, que se encuentran en una concentración mucho mayor en el exterior de la célula que en su interior. La despolarización supone la apertura de canales especiales en la membrana, lo que permite que los iones calcio pasen a su través entrando en la célula movidos por la fuerza electromotriz que genera el potencial de membrana y por la menor concentración de calcio en el interior de la célula. Pero si la despolarización es lo bastante intensa, el flujo de iones se detiene por la oposición de fuerzas eléctricas. El ion calcio transporta dos cargas eléctricas positivas y, cuando el interior de la célula se carga en ese sentido, los iones sufren repulsión. En ese caso, aunque los canales de la membrana sigan abiertos por la despolarización, los iones calcio no pueden entrar en la célula y no se libera neurotransmisor. El grado de despolarización presináptica que anula la transmisión sináptica se ha denominado potencial de supresión; y la respuesta postsináptica al cabo de un pulso, potencial postsináptico de cierre.

Los resultados iniciales de las investigaciones de la sinapsis gigante apoyaron la hipótesis que formulara Katz, según la cual el calcio desencadenaba la liberación de neurotransmisor. No desaparecerían los recelos hacia la misma hasta conocerse los resultados de tres líneas de investigación, a finales de los 60 y principios de los 70.

En primer lugar, Katz y Miledi demostraron que los iones calcio podían generar potenciales de acción, pero sólo en la terminación presináptica, y que dichos potenciales se acompañaban de la liberación de transmisor. Pusieron de manifiesto, en particular, que aun bloqueando con drogas la capacidad de la membrana presináptica para permitir el paso de iones sodio y potasio, se detectaban potenciales de acción, junto con la subsiguiente despolarización postsináptica. Lo que modula el potencial a través de la membrana de una neurona cuando se propaga un potencial de acción es la redistribución de iones y, en consecuencia, de cargas eléctricas entre el interior de la célula y el medio extracelular. Entran primero en la célula los iones sodio y posteriormente salen de ella los iones potasio. El potencial de acción detectado por Katz y Miledi debía depender enteramente de la entrada de iones calcio. Partiendo de estas observaciones, dedujeron que la



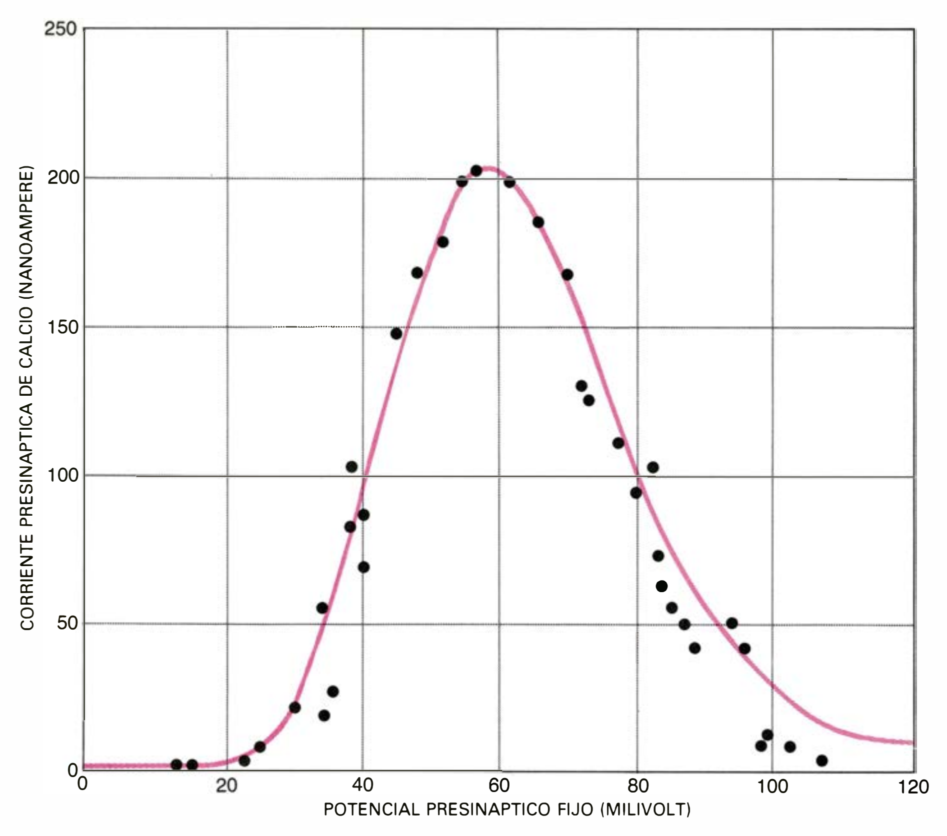
EXPERIMENTOS DE VOLTAJE FIJO llevados a cabo por el autor y sus colegas sometiendo la terminación presináptica de la sinapsis gigante a una elevación de voltaje artificial y escalonada (*a*). Mediante drogas, la membrana de la terminación se hizo impermeable a todos los iones, salvo al calcio, de modo que la corriente que atravesaba la membrana (*b*) representara sólo el flujo de iones calcio. Se midió esa corriente detectando la aplicada por el circuito de voltaje fijo para contrarrestar el cambio de voltaje que producía la entrada de calcio. En la gráfica de la izquierda la elevación del voltaje aplicado es de 30 milivolt. Una pequeña corriente de calcio fluye lentamente hacia el interior de la terminación presináptica. La entrada de calcio origina la liberación de neurotransmisor, lo que se constata por el cambio de potencial de la terminación postsináptica (*c*). En la gráfica central, la elevación del voltaje aplicado es de 52 milivolt. La corriente de calcio aumenta más rápidamente y alcanza un nivel superior; la respuesta postsináptica es más pronunciada, si bien no empieza hasta casi un milisegundo (*flechas*) después de la aplicación del voltaje. En la gráfica derecha la elevación del voltaje es de 130 milivolt. La corriente de calcio se suprime y, por ende, la respuesta postsináptica. Tras la aplicación del voltaje, cuando éste desciende, se observa una corriente de calcio denominada "corriente de cola". La terminación postsináptica responde ya a los 0,2 milisegundos (*flecha*). Los datos recogidos condujeron al establecimiento de un modelo de transmisión sináptica, una descripción matemática de cómo responde la sinapsis al voltaje. En la parte inferior de la figura se han representado los potenciales postsinápticos (*d*), así como la corriente de calcio presináptica (*e*) resultante del modelo y de los datos (*puntos*).

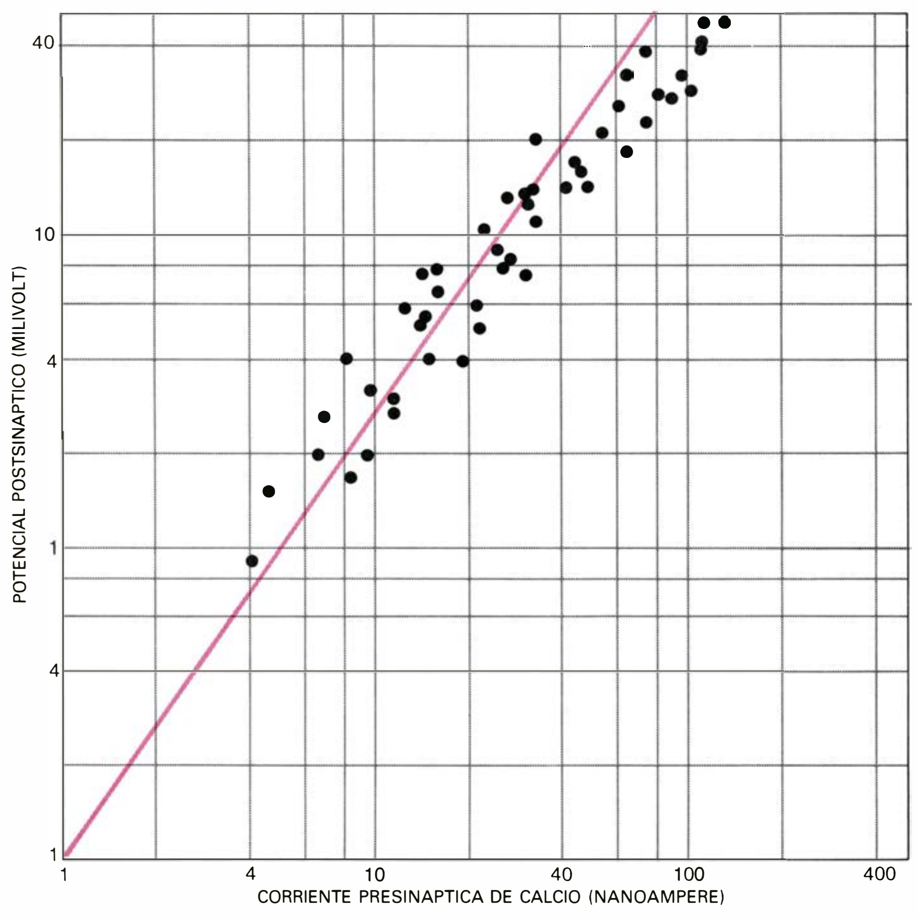
membrana presináptica poseía canales de calcio; se suprimían los potenciales de acción al eliminar el calcio de la solución de baño.

Por otro lado, Miledi llevó a cabo un experimento mucho más simple. Mostró que, en ausencia de calcio extracelular, bastaba inyectar iones calcio en la terminación presináptica para producir la despolarización postsináptica. Por tanto, el calcio inyectado debía provocar la liberación del transmisor.

La tercera línea de trabajo fue desarrollada por John R. Blinks, Charles Nicholson y el autor. Mostramos que si la terminación presináptica se llenaba con aecuorina, una proteína que emite luz en presencia de calcio, podía detectarse luminiscencia en la terminación presináptica durante la transmisión sináptica normal. De lo que se deducía que la concentración de calcio en la terminación presináptica aumentaba en esa situación. Un experimento ulterior llevado a cabo por Nicholson y el autor puso en claro que la luminiscencia detectada reflejaba fielmente los fenómenos de la transmisión sináptica. Por ejemplo, cuando aplicábamos un potencial supresor a la terminación presináptica no se detectaba luz durante el pulso despolarizante. Pero sí aparecía cuando se detenía el pulso y la terminación postsináptica respondía con un potencial de cierre. Ello demostraba que la supresión de la transmisión se debía específicamente a un bloqueo de la entrada de iones calcio.

No cabe duda, por tanto, de que el calcio es el agente que desencadena la transmisión sináptica. Quedaban aún por aclarar dos cuestiones: la relación existente entre la despolarización y la entrada de calcio y la relación entre la entrada de calcio y la liberación de transmisor. Con ese propósito, nuestro grupo decidió cambiar la técnica experimental. Hasta entonces habíamos utilizado una corriente fija, es decir, aplicábamos a la terminación presináptica una corriente constante y medíamos la consiguiente despolarización, esto es, el cambio de potencial a través de la membrana de la terminación. La membrana muestra propiedades eléctricas propias de una resistencia y de un condensador, es decir, se opone al flujo de corriente eléctrica y almacena también carga eléctrica originando una demora en su respuesta a un pulso de corriente. En general, el procedimiento de aplicación de una corriente fija se parece, por





RESULTADOS de experimentos de voltaje fijo. La relación entre el valor fijo del potencial presináptico y el nivel de meseta de la corriente de calcio que fluye hacia el interior de la terminación presináptica (*arriba*) no es lineal; la corriente alcanza un máximo para un voltaje fijo de unos 60 milivolt y es despreciable para un potencial de unos 110 milivolt. La relación entre la corriente de calcio y la respuesta postsináptica (*abajo*) sigue una configuración lineal. Los dos ejes de la gráfica inferior son logarítmicos.

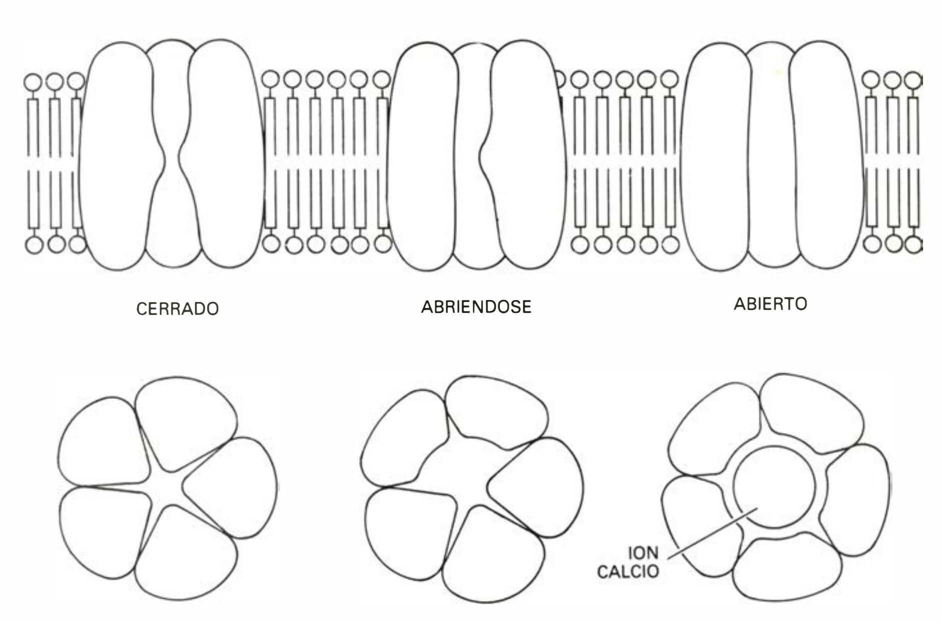
tanto, al de cargar un condensador en paralelo con una resistencia y medir el voltaje a través del par.

Los problemas que plantea el método de corriente fija nacen del hecho de que la membrana de la neurona es más compleja que el conjunto formado por un condensador en paralelo con una resistencia. El cambio de potencial a través de la membrana determina la apertura de canales y permite que varios iones (entre ellos los de calcio) entren o abandonen la neurona. En resumen, la conductividad de la membrana depende del potencial. El movimiento de iones, que constituye una corriente eléctrica, produce, a su vez, cambios en la diferencia de potencial y éste en la membrana, estableciéndose un círculo vicioso. La consecuencia última de esta automodulación de la membrana es la generación de un potencial de acción. Investigar las propiedades de la membrana, cuando ésta cambia activamente su potencial y no responde ya pasivamente a la manipulación experimental, resulta problemático. Las propiedades activas de la membrana resultan cruciales para el funcionamiento neuronal.

Decidimos, pues, dejar de utilizar la técnica de corriente fija y usar la estrategia opuesta, aplicando el método de potencial fijo introducido por Kenneth S. Cole, del Laboratorio de Biología Marina. A. L. Hodgkin y A. F. Huxley, de la Universidad de Cambridge, habían utilizado dicha técnica para investigar los fenómenos eléctricos del potencial de acción en el axón gigante de tercer orden del calamar. En la técnica del voltaje fijo, un pulso de corriente desplaza rápidamente el potencial de membrana de la neurona hasta un determinado nivel de despolarización. Dicho nivel se mantiene constante ("fijo"), a pesar del movimiento de iones a través de los canales que se han abierto en la membrana. La fijación se consigue mediante un circuito electrónico de realimentación que modifica automáticamente el nivel de corriente aplicada para mantener la fijación.

La técnica del voltaje fijo presenta dos ventajas. En primer lugar, la corriente aplicada cuando se alcanza el nivel de fijación debe contrarrestar exactamente la corriente iónica, por cuya razón la determinación de la corriente aplicada constituye una medida de la corriente iónica. Una medida que, además, no puede obtenerse de otro modo, ya que los microelectrodos registran únicamente voltajes. En segundo lugar, el salto de potencial con que se inicia la fijación es mucho más rápido que los cambios inducidos en la estructura de la membrana. Ello significa que

el circuito carga el condensador de la membrana mucho antes de que las corrientes iónicas empiecen a fluir a través de los canales. Con ello, las corrientes iónicas pueden distinguirse perfectamente de la corriente capacitativa que, simplemente, queda almacenada en la terminación. Podíamos esperar, pues, que nuestras investigaciones de la sinapsis gigante permitieran estudiar el curso temporal completo de los cambios de la conductividad en la membrana presináptica o, lo que es lo mismo, la apertura y cierre de canales y el paso de iones a su través para un determinado nivel de despolarización. En efecto, podíamos esperar que la determinación de la corriente de iones calcio a varios niveles de despolarización condujera a la formulación de un modelo matemático de la conductancia de calcio en la membrana presináptica, es decir, una expresión matemática que sugiriera cómo cambian los canales de calcio en respuesta a las modificaciones del patrón de potencial.

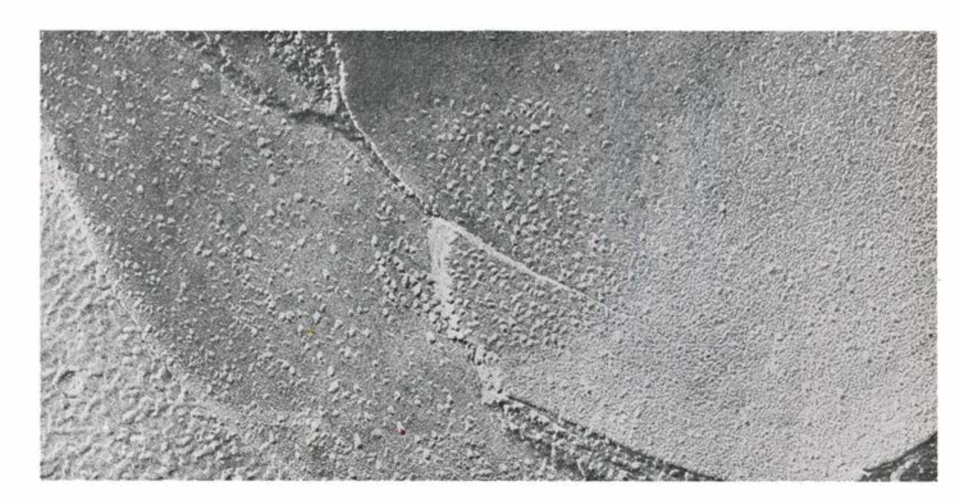


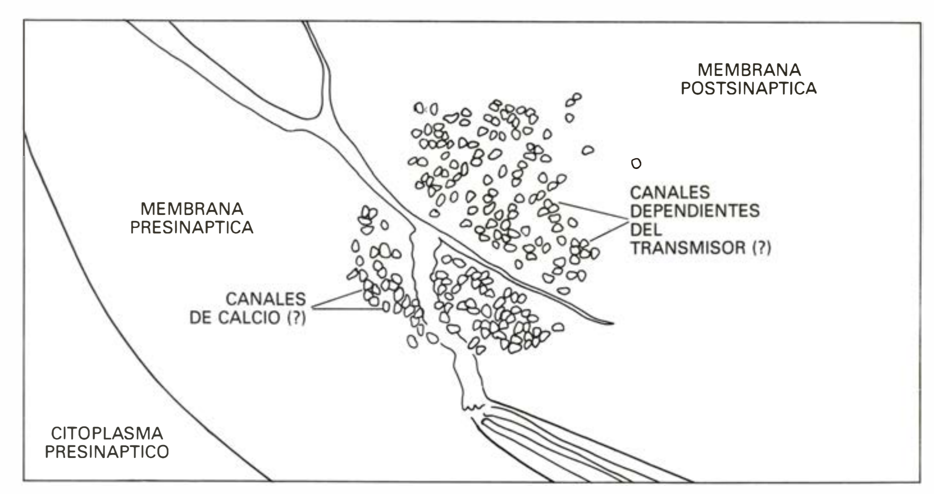
CANALES DE CALCIO en la membrana de una terminación presináptica. Deben abrirse en respuesta a un cambio del voltaje para que se establezca un flujo de calcio hacia el interior de la terminación. El modelo de transmisión sináptica postulado por el autor y sus colegas sugiere que deben producirse cinco cambios independientes en la estructura del canal para que se abra. Por tanto, cada canal puede representarse hipotéticamente por una roseta formada por cinco proteínas, que atravesarían la membrana. El cambio de potencial debe modificar la configuración de las cinco proteínas para que penetre el calcio. La membrana de una neurona, y la de sus terminaciones, consta de una doble capa de lípidos.

Durante los veranos de 1975 a 1978, Kerry Walton y el autor realizaron una serie de experimentos de voltaje fijo en el Laboratorio de Biología Marina. Bloqueábamos la conductancia al sodio y potasio de la membrana presináptica al objeto de detectar únicamente el flujo de iones calcio. Por fortuna, la corriente de calcio resultó de fácil medición. La conductividad de la membrana al calcio se relacionaba de forma compleja con el nivel de despolarización.

Consideremos el curso temporal de la corriente. En respuesta a una pequeña elevación del voltaje de despolarización, la corriente de calcio aumenta muy lentamente; tarda varios milisegundos en alcanzar una meseta. En respuesta a una elevación mayor del voltaje, alcanza la meseta en una fracción de milisegundo. Consideremos también la amplitud de la meseta. Apenas se detecta corriente de calcio si la elevación de potencial no es al menos de 15 milivolt. Para una elevación mayor, la amplitud de la meseta es notablemente superior. Para una elevación de 60 milivolt, que da lugar a un potencial fijo en la membrana terminal de −10 milivolt, la amplitud es máxima. Para elevaciones mayores, la amplitud decrece, una situación que era de esperar si consideramos el potencial supresor descrito por Katz y Miledi. Para elevaciones mayores de 140 milivolt, la corriente torna a ser muy pequeña.

Al final de un pulso de fijación de voltaje, el potencial presináptico vuelve a su valor de reposo de −70 milivolt.





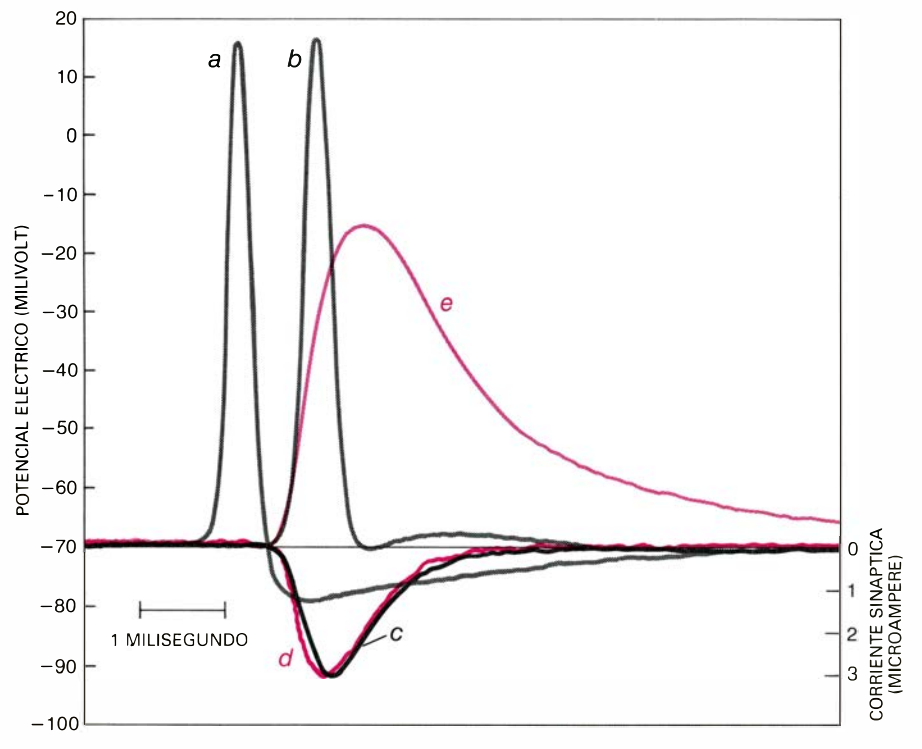
PEQUEÑAS PARTICULAS de la membrana de la terminación presináptica, que podrían corresponderse con canales de calcio. Las partículas de la membrana postsináptica quizá sean canales que se abren en respuesta a la llegada de moléculas de transmisor. El tejido mostrado en esta micrografía electrónica de barrido aparece tras un tratamiento por criofractura. En esta técnica se congela primero la muestra y, al romper el tejido, la preparación se divide siguiendo la porción media de las membranas, es decir, separando las capas de lípidos. Las partículas se hallan, embebidas, en la membrana. La micrografía electrónica es de Pumplin y Reese, y representa una ampliación de, aproximadamente, 105.000 diámetros.

La vuelta a dicho potencial, que se consigue rápidamente, va acompañada de un nuevo flujo de iones calcio en la terminación presináptica (la corriente de cola); esta corriente no presenta demora, se inicia en cuanto finaliza la aplicación de voltaje.

La corriente de cola puede explicarse del modo siguiente: Durante la aplicación del voltaje, los canales de calcio de la membrana presináptica se mantienen abiertos y, al acabar la aplicación, se cierran. Sin embargo, el cierre de los canales es más lento que la recuperación del potencial de reposo; los canales permanecen abiertos durante un breve intervalo tras la caída de potencial, justo cuando la fuerza electromotriz favorece la entrada de iones calcio.

Sin ninguna duda, la corriente de cola es responsable de la liberación del transmisor que produce la respuesta postsináptica de cierre. Es de destacar que la respuesta de cierre se inicie a los 0,2 milisegundos después de que la corriente de cola empiece a fluir; lo que no deja de resultar llamativo si se tiene en cuenta que la respuesta postsináptica normal a la llegada de un potencial de acción a la terminación presináptica se demora alrededor de un milisegundo. Debe concluirse que este retraso se debe, en su mayor parte, al tiempo requerido para que los canales de calcio se abran cuando la membrana presináptica se despolariza inicialmente. Los fenómenos subsiguientes en la transmisión sináptica se sucederán con rapidez; en particular, una vez los iones de calcio han entrado en la terminación presináptica, deben actuar rápidamente para liberar el transmisor.

Nuestro siguiente objetivo consistía en obtener de los datos experimentales una expresión matemática que relacionara la corriente de calcio con un determinado esquema de potencial. A tal fin iniciamos una colaboración con Izchak Z. Steinberg, del Instituto Weizmann de la Ciencia, de Israel. El núcleo del modelo matemático consistía en la descripción de la respuesta de los canales de calcio de la membrana a la despolarización. Las hipótesis de partida de Steinberg, Walton y el autor eran similares a las propuestas por Hodgkin y Huxley para los canales de sodio y potasio. Suponíamos que de la diferencia entre las concentraciones de calcio en el interior y exterior de la terminación presináptica resultaba una fuerza motriz. Dábamos también por sentado que los cambios de la estructura de los canales de calcio, dependientes de modificaciones del voltaje que determinaban su apertura, podían desencadenar un incremento de la conductividad de la membrana presináptica a los iones calcio. Una de las posibilidades más simples era que cada canal constara de cierto número de subunidades, y que cada subunidad existiera en dos estados, *s* y *s'*. Cada estado correspondería, probablemente, a una forma diferente. Si todas las subunidades de un canal se encuentran en el estado *s'* (estado activado), el canal está abierto. En caso contrario, se halla cerrado. La probabilidad de que una subunidad pase al estado *s'* viene determinada por el voltaje existente a través de la membrana; cuanto mayor sea la despolarización, más probable resultará que la subunidad se active. Se suponía, además, que las subunidades no interaccionaban entre sí; cada subunidad cambiaría de forma independientemente.



POTENCIAL DE ACCION ARTIFICIAL generado por un circuito de voltaje fijo. Dicho potencial produce, en la sinapsis gigante, idénticos efectos a los que causa un potencial de acción natural. Un microelectrodo implantado en la terminación presináptica registra primero un potencial de acción natural (*a*). Normalmente desencadena un potencial de acción postsináptico (*b*). Aquí, sin embargo, la terminación postsináptica se mantiene por voltaje fijo en su potencial de reposo, de modo que las moléculas de transmisor que llegan a la terminación postsináptica abren los canales de la membrana y los iones fluyen a su través, pero el circuito de voltaje fijo aplica una intensidad justa para mantener la corriente neta igual a cero y el voltaje inalterado. La corriente aplicada (*c*) es igual, en cuanto a su curso temporal e intensidad, a la "corriente sináptica" que atraviesa la membrana postsináptica. A continuación, los canales de las dos membranas de la sinapsis que se abren en respuesta a los cambios de voltaje (a diferencia de los que lo hacen cuando llega el transmisor) se bloquean mediante drogas, y así impiden el paso a los iones sodio y potasio, que constituyen la base del potencial de acción natural. Si el circuito de voltaje fijo presináptico aplica el patrón de voltaje del potencial de acción registrado anteriormente, la corriente sináptica resultante (*d*) tiene la misma latencia, intensidad y curso temporal que la generada por fenómenos naturales. Si la terminación postsináptica deja de someterse al voltaje fijo, pero se mantienen las drogas, la terminación postsináptica responde al potencial de acción artificial mostrando un prolongado cambio de voltaje (*e*). El cambio representa el paso de iones a través de canales dependientes del transmisor y suele levantar las compuertas de los canales de la membrana, lo que genera el potencial de acción postsináptico.

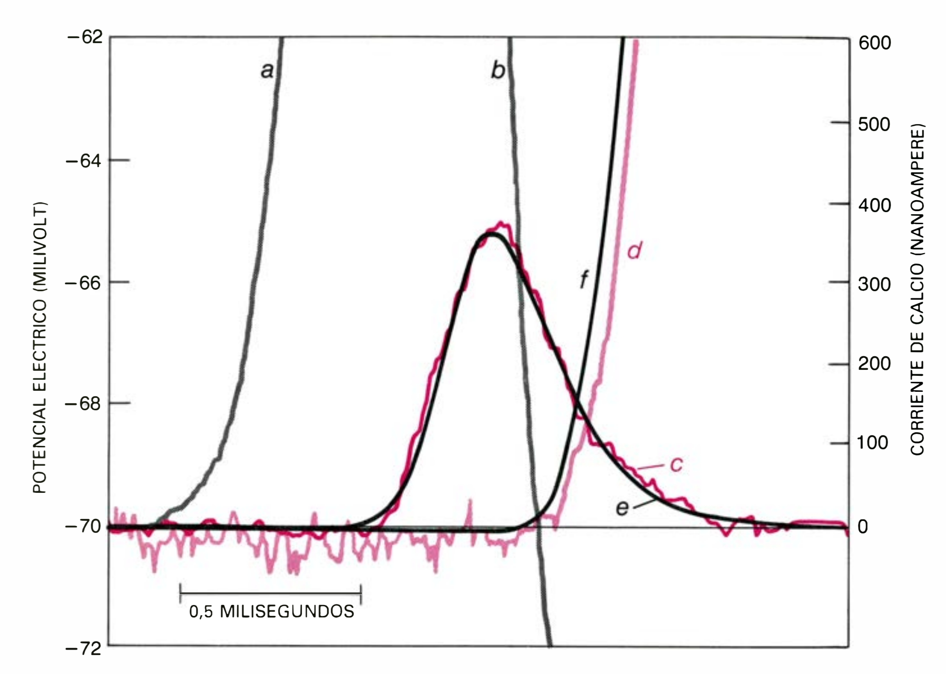
Sobre esta base hipotética, y arrancando de las leyes de la termodinámica, puede elaborarse una serie de ecuaciones que representen el curso temporal de la corriente de calcio en respuesta a un voltaje presináptico fijo. La corriente es proporcional a la velocidad a la que los iones fluyen a través de un canal abierto, multiplicada por la fracción de canales abiertos. Cada ecuación incorpora una suposición diferente sobre el número de subunidades por canal. La ecuación que más se ajusta al curso temporal y la dependencia de voltaje de la corriente de calcio que hemos medido en nuestros experimentos es aquella que postula un número de cinco subunidades.

Una hipotética configuración del canal (que se ofrece en ausencia de pruebas más directas) sería un conjunto de cinco proteínas idénticas que abarcaran todo el espesor de la membrana presináptica. Las cinco moléculas proteicas podrían disponerse en forma de roseta. Cuando todas las proteínas adoptan la forma *s'*, circunscriben un canal que permite la entrada de iones calcio. Recientemente, sin embargo, el estudio de los distintos canales de calcio, llevado a cabo por varios investigadores, su-

giere como configuración alternativa un modelo en el que cada canal queda circunscrito por una hélice de proteínas.

Los experimentos de voltaje o potencial fijo muestran que la corriente de calcio se satura, esto es, alcanza un valor máximo. Por tanto, en cada unidad de tiempo sólo un número limitado de iones calcio atravesarán el canal, con independencia de la fuerza impulsora. Para explicar la saturación admitíase que cada canal poseía una barrera energética. Quizás una fracción de cada proteína sobresalga ligeramente a la luz del canal y posea una carga eléctrica positiva. Puesto que la carga tendería a repeler el ion de calcio entrante, la fuerza impulsora debería empujar los iones a través del canal y la velocidad de flujo tendría un límite. Los experimentos de voltaje fijo muestran también que a la caída de la corriente de calcio al final de la aplicación del voltaje sigue, simplemente, una caída exponencial y no una disminución gradual, que indicaría una secuencia más compleja de fenómenos. Estos resultados están de acuerdo con la hipótesis de que basta, para cerrarlo, un cambio de forma de una sola subunidad en un canal abierto.

A partir de un modelo matemático de la respuesta de los canales de calcio a un determinado voltaje fijo, podíamos calcular la respuesta de los canales al potencial de acción que llega a la terminación presináptica. Simulábamos el potencial de acción aplicando una serie de incrementos de voltaje y empleábamos el modelo para predecir la corriente de calcio resultante de la sucesión de incrementos. No conociendo el número de canales de calcio en la membrana presináptica, ni la conductividad de un canal individual, los resultados del modelo no podían sugerir la magnitud real de la corriente de calcio, pero sí su curso temporal y magnitud relativa. Los resultados indicaron que la corriente de calcio empezaba a fluir al final del potencial de acción, cuando el voltaje presináptico volvía a su nivel de reposo.



PARA DETERMINAR EL PAPEL DEL CALCIO en la transmisión sináptica se recurre a un potencial de acción artificial. La espiga de potencial puede aplicarse mientras se bloquea con fármacos el flujo de diversos iones a través de la membrana presináptica. En primer lugar se aplica el potencial artificial mientras se bloquean el sodio y el potasio. En la escala de la gráfica sólo se aprecia el ascenso (*a*) y la caída (*b*) del potencial. Se detecta así la cantidad de corriente que debe proporcionar el circuito de voltaje fijo para producir el potencial. Dicha corriente representa la suma de la intensidad que altera el voltaje a través de la membrana, en ausencia de flujo de sodio y potasio, y la cantidad que contrarresta exactamente el flujo de calcio, no bloqueado. Se repite el experimento bloqueando también el canal de calcio. La diferencia entre ambos resultados corresponde a la corriente de calcio (*c*). Se puede concluir que un potencial de acción produce la liberación de neurotransmisor de la terminación presináptica originando una corriente de iones calcio que entra en la terminación durante la caída de la espiga de potencial. La respuesta postsináptica al transmisor (*d*) empieza poco después. La gráfica muestra también la corriente de calcio (*e*) y la respuesta postsináptica (*f*) que predice nuestro modelo de transmisión sináptica.

Nuestro tercer objetivo consistía en relacionar la entrada de calcio en la terminación presináptica con la liberación de neurotransmisor. Puesto que el período de latencia entre ambos fenómenos es tan sólo de 0,2 milisegundos, postulamos que el calcio entraba en la terminación presináptica en un lugar muy próximo al punto de liberación del transmisor. Esperábamos que tal región se evidenciaría en las micrografías electrónicas por la presencia de vesículas sinápticas.

Por microscopía electrónica de las sinapsis gigantes se puso de manifiesto, en efecto, la existencia de "zonas activas", caracterizadas por un acúmulo de vesículas en la terminación presináptica y un engrosamiento de la membrana en la terminación postsináptica. Micrografías electrónicas de barrido realizadas por la técnica de criofractura revelaron una estructuración mayor. En la técnica de la criofractura se congela una sección de tejido que incluya la sinapsis gigante; seguidamente se rompe, con lo que el tejido tiende a separarse por la parte media de la membrana presináptica, o de la membrana postsináptica. Las micrografías electrónicas de las muestras obtenidas por esta técnica revelan que la membrana presináptica posee en las zonas activas alrededor de 1500 pequeñas partículas ancladas en su estructura. Nuestra hipótesis, y la de otros investigadores, postula que tales partículas son los canales de calcio.

A fin de que en nuestro modelo se recogiera la relación que guardan la entrada de calcio y la liberación de transmisor incorporamos nuevos supuestos. Se trataba, otra vez, de las posibilidades más simples. Supusimos que, en la terminación presináptica, el calcio se unía a una molécula que denominamos factor promotor de fusión. En respuesta a la unión, parte de la molécula del factor alcanza un estado activado a través de una reacción cinética de primer orden, es decir, una reacción cuya velocidad global depende de la concentración de una de las sustancias reaccionantes, en este caso del factor promotor de la fusión.

El factor promotor de la fusión, activado, determina que las vesículas sinápticas se unan a la membrana presináptica y liberen su contenido de neurotransmisor. La velocidad de la reacción depende únicamente de la concentración del factor activado. El factor activado vuelve luego a un estado inactivo. Mientras tanto, las moléculas de neurotransmisor abren canales en la membrana postsináptica para que fluyan corrientes iónicas y se despolarice la membrana. El modelo resultante de tales supuestos permitió predecir las respuestas postsinápticas medidas en los experimentos de voltaje fijo, incluyendo el potencial postsináptico de cierre que sigue a una despolarización presináptica superior al potencial de supresión.

Si bien los estudios realizados con la técnica del voltaje fijo habían proporcionado abundantes resultados, que permitían describir matemáticamente la corriente de calcio presináptica y su

relación con la amplitud del potencial postsináptico, el modelo debía contrastarse con determinaciones reales de la corriente de calcio durante el curso de un potencial de acción. En 1979 y 1980 se realizaron tales verificaciones. En una serie de experimentos llevados a cabo por Mutsuyuki Sugimori, Sanford M. Simon y el autor, en el Laboratorio de Biología Marina, se registraron simultáneamente en la sinapsis gigante un potencial de acción presináptico y el potencial de acción postsináptico resultante. Los cambios registrados en el potencial de membrana se almacenaron en la memoria de un ordenador digital, para su posterior aplicación en nuevos experimentos.

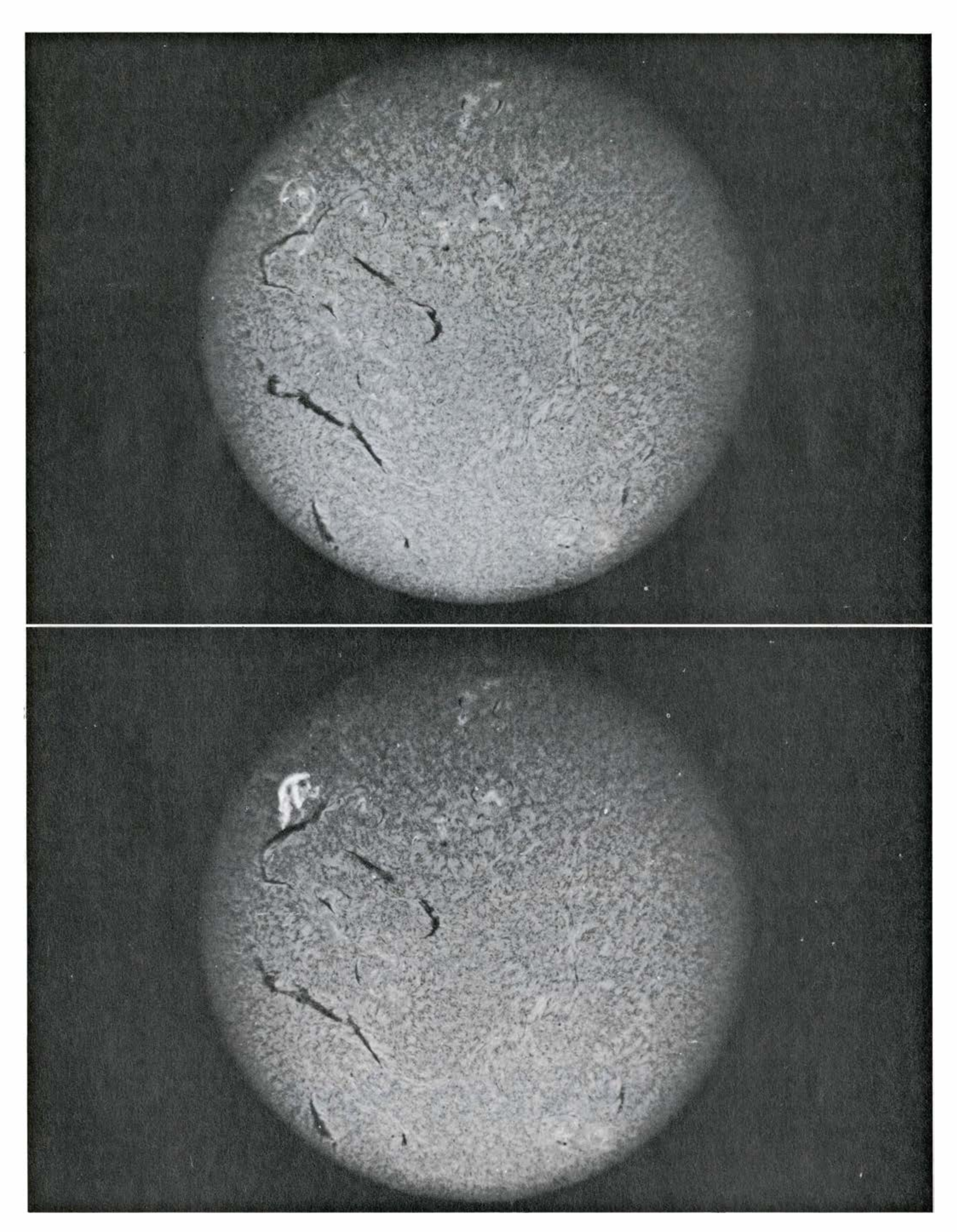
Al igual que en los primeros experimentos de voltaje fijo, se bloqueó químicamente la conductancia dependiente del voltaje, que las membranas presentan para el sodio y el potasio; y se dejaba a la membrana presináptica con conductancia dependiente de voltaje para el calcio y, a la membrana postsináptica, con los canales iónicos que se abren cuando llegan las moléculas de transmisor. Los nuevos experimentos diferían en el sentido de que la membrana presináptica no se fijaba a un nivel constante de despolarización. Muy al contrario, el amplificador y el microelectrodo que aplicaba corriente en la terminación presináptica se controlaban por el voltaje presináptico que habíamos registrado con anterioridad. De esta forma imponíamos artificialmente a la terminación el patrón de voltaje de un potencial de acción aún en ausencia de las condiciones normales del potencial de acción (entrada de iones sodio y salida de iones potasio). La respuesta postsináptica al potencial de acción artificial venía a coincidir con la respuesta al potencial de acción normal, lo que indicaba que el potencial artificial era capaz de producir una liberación de transmisor en la terminación presináptica con una amplitud y curso temporal idénticos a los normales.

Pensamos, por tanto, que las determinaciones llevadas a cabo después de bloquear la conducción iónica y estimular la terminación presináptica con un potencial de acción artificial constituirían una representación válida de los fenómenos naturales. Medimos, pues, la cantidad de corriente que el circuito de voltaje fijo aplicaba en la terminación presináptica para producir el potencial de acción artificial. Puesto que las corrientes de sodio y potasio estaban bloqueadas, la corriente aplicada tenía dos componentes. Parte de ella despolarizaba la membrana y compensaba la ausencia de corrientes de sodio y potasio; el resto contrarrestaba exactamente la corriente de calcio que fluía a través de la membrana. El paso siguiente consistió en bloquear químicamente la corriente de calcio y repetir el experimento. La diferencia entre ambos resultados medía la corriente de calcio, y coincidía, con bastante aproximación, con la calculada a partir de nuestro modelo.

Recientemente, nuestros resultados han sido confirmados por las investigaciones de Steven J. Smith, Milton P. Charlton y Robert S. Zucker, del Laboratorio de Biología Marina, y por Miledi y Parker, en Nápoles. Se utilizó en ellas un colorante que cambiaba de tono en presencia de calcio. El colorante se inyecta en la terminación presináptica de la sinapsis gigante; sus cambios de color sugieren un curso temporal de la corriente de calcio muy similar al que nosotros hemos determinado con la técnica de voltaje fijo.

Ante nosotros se abren hoy muchas perspectivas. Años enteros me ha venido tentando la idea de que la transmisión sináptica era una mera forma modificada de crecimiento neural. Para algo, la concentración de calcio en el tejido nervioso en desarrollo parece controlar la velocidad a la cual el cono de crecimiento, que es el extremo distal en desarrollo de un axón, añade nueva membrana celular a su superficie. También entonces la membrana del cono de crecimiento muestra conductancia para los iones calcio dependiente del voltaje.

Quizá deba entenderse la terminación sináptica como una forma modificada del cono de crecimiento, en el que éste ha cesado y ya no tiene lugar el constante incremento del área de la membrana. En una neurona embrionaria, las vesículas del cono de crecimiento podrían fusionarse con la membrana para incrementar su extensión e incorporar nuevas proteínas. En la vida posterior del organismo, las vesículas de la terminación presináptica que aparecen en el cono de crecimiento se fusionarían con la membrana liberando su contenido de transmisor y volviendo de nuevo al interior de la terminación. (De ese último reciclaje hablaban ya hace unos años John E. Heuser y Thomas S. Reese.) En fin, el mecanismo implicado en el crecimiento y plasticidad del sistema nervioso en el desarrollo serviría luego para la propagación de mensajes. La comprensión de los procesos moleculares que constituyen la base de tales mecanismos resultará esencial para la interpretación del funcionamiento del cerebro.



FULGURACION SOLAR, vista en la línea H-alpha del hidrógeno neutro. En la fotografía de arriba la evolución de una fulguración, observada con un telescopio de 25 centímetros, el 13 de agosto de 1980 desde el Observatorio del Instituto de Astrofísica de Canarias en Izaña (Tenerife). Se inicia con la aparición de unos puntos brillantes que, en menos de 10 minutos se han extendido hasta cubrir un área del orden de la superficie terrestre. Este brillo se suele observar distribuido en dos franjas a ambos lados de la línea neutra que separa zonas de diferente polaridad magnética. Posteriormente se produce un lento declinar del brillo, que puede persistir durante varias horas. Sobre el disco puede apreciarse otras típicas estructuras cromosféricas como las manchas, filamentos oscuros (llamados protuberancias cuando son observadas en el borde) y las fáculas cromosféricas. (Fotografías tomadas por los autores.)

Las fulguraciones solares

En la atmósfera solar tienen lugar gigantescas explosiones, que influyen en la Tierra. Mediante una serie de observaciones a escala mundial se intenta explicar su origen y evolución

J. I. García de la Rosa, F. Herrera y M. Vázquez

El día primero de septiembre de 1859, cuando el astrónomo inglés Richard Carrington estaba dibujando grupos de manchas solares fue sorprendido por la aparición de dos zonas muy brillantes cerca de un grupo. Como él mismo señala en su informe, "anoté el tiempo del cronómetro, y viendo que la explosión aumentaba muy rápidamente y estando algo nervioso por la sorpresa, corrí apresuradamente a llamar a alguien que fuera cotestigo del fenómeno. Al volver al cabo de un minuto, me sentí frustrado: se había debilitado y cambiado mucho". Afortunadamente, a pocos kilómetros de distancia R. Hodgson, otro astrónomo, había observado el mismo fenómeno. Unas 18 horas más tarde se producía una de las tormentas magnéticas más intensas que se recuerdan en los registros terrestres y se vieron auroras hasta en zonas tropicales.

Se había detectado por primera vez una fulguración solar, uno de los fenómenos más intrigantes de la astrofísica moderna, que está relacionado con los tres aspectos fundamentales bajo los cuales se puede estudiar el Sol: como una estrella, como un laboratorio de plasma cósmico y como la fuente de las relaciones entre el Sol y la Tierra.

Lo primero que cabe preguntarse es de dónde puede provenir la energía que de forma tan repentina y catastrófica se libera en una zona limitada de la atmósfera solar. Para ello empecemos por las diferentes fuentes energéticas disponibles. Desde su nacimiento podemos asignar al Sol cierto contenido de energía que se distribuye en muy diversas formas: energía térmica, gravitatoria, de rotación, nuclear, subnuclear y otras.

En la fase actual de la vida del astro, la disipación de energía nuclear es, con gran diferencia sobre las restantes, la fuente más importante de la emisión energética. A las altísimas temperaturas del interior solar, rondando los 15 millones de grados, algunos núcleos de hidrógeno (protones) encierran energía suficiente para superar su repulsión mutua; originan núcleos de helio, liberando una energía de $6{,}3 \times 10^{14}$ joule por kilogramo de material transformado. Esta energía se libera en forma de neutrinos y fotones de rayos gamma. A diferencia de los primeros, que pueden escapar fácilmente hacia el exterior, para los fotones el material solar no es transparente y sufren una larga cadena de absorciones y reemisiones, antes de ser radiados hacia el exterior. Cuando el fotón ha recorrido dos terceras partes de su camino hacia la superficie, ha bajado la temperatura lo suficiente para permitir que los átomos lo puedan absorber con eficacia; este bloqueo en el transporte de energía por radiación desencadena la puesta en marcha de la convección, en la que la energía se transporta ahora mecánicamente hasta la superficie por corrientes turbulentas de material solar. En la superficie volvemos a hallar las condiciones físicas necesarias para que torne a predominar la radiación como mecanismo de transporte de la energía.

Hasta aquí hemos considerado el Sol como si se tratara de una bola de gas caliente cuya emisión de energía fuera, por tanto, uniforme en toda su superficie. Sin embargo, es bien conocida la existencia de estructuras que rompen esa uniformidad: manchas, filamentos, fulguraciones y otras, que, aun suponiendo variaciones, como máximo de una milésima, en la energía emitida, son en sí mismos fenómenos de enorme interés. Estas inhomogeneidades surgen a raíz de una cadena de procesos en los que, por mediación de los campos magnéticos, parte de la energía total aparece localizada en pequeñas áreas del Sol. Simplificando muchísimo las cosas, diríamos que en el Sol se está convirtiendo continuamente energía mecánica de rotación en energía magnética, capaz de ser concentrada en áreas pequeñas.

La materia que se encuentra en el Sol está en estado de plasma, que se distingue de la materia en estado gaseoso normal por ofrecer, entre otras peculiaridades, una conductividad eléctrica muy alta. La rotación de este plasma en presencia de un campo magnético induce corrientes eléctricas capaces, no sólo de mantener ese mismo campo magnético, sino de amplificarlo también en forma análoga a la que trabajan las dínamos de automóviles y bicicletas.

Para la observación e interpretación de los fenómenos solares se ha de tener en cuenta la zona de donde procede la radiación, que será función de la longitud de onda. (Si hiciéramos un corte en profundidad en el Sol, nos iríamos encontrando con las siguientes regiones: corona, cromosfera, fotosfera, interior radiante y núcleo.) Así, la radiación visible procede de la fotosfera, capa desde la cual los fotones de luz visible tienen una probabilidad muy baja de ser absorbidos en su camino hacia la Tierra. La radiación infrarroja nos da (concretamente a 1,6 micras) información sobre la región más profunda de la fotosfera, las ondas milimétricas sobre la zona de transición fotosfera-cromosfera y las ondas centimétricas y métricas sobre la cromosfera y corona, respectivamente. En cuanto a rayos X y ultravioleta su producción exige altas temperaturas que sólo pueden encontrarse en la corona y cromosfera. Por otro lado, ciertas líneas del espectro visible (como Hα, de la que nos ocuparemos más adelante) se originan en la cromosfera solar.

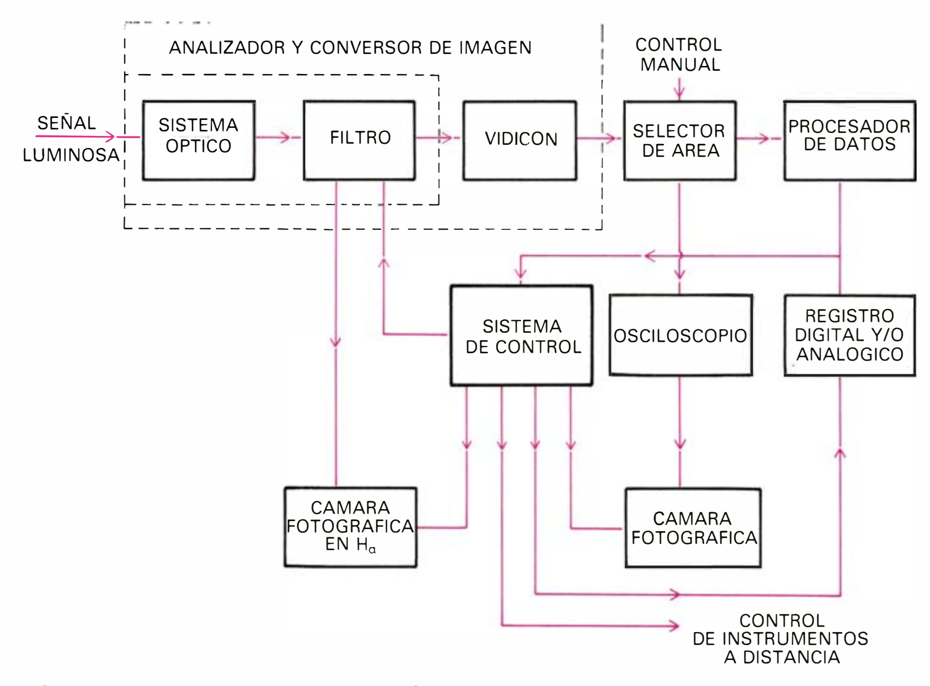
La observación del Sol en longitudes de onda diferentes nos proporcionará información de diferentes alturas de la atmosfera solar, haciendo que varíe el aspecto de cualquier estructura o fenómeno bajo estudio; algo parecido a lo que obtendríamos si dibujáramos la morfología de una montaña terrestre observada por encima o por debajo de una capa de nubes situada a media altura. Antes de describir una fulguración,

habrá que especificar, por tanto, a qué altura nos estamos refiriendo. En la fotosfera por ejemplo, según se observa en luz blanca, raras son las ocasiones en que una fulguración llega a producir un abrillantamiento apreciable como el que deslumbró a Carrington; es en las capas superiores donde las fulguraciones se distinguen mejor. Este hecho induce a pensar en la fulguración como una explosión producida a una gran altura (unos 8000 kilómetros) sobre la fotosfera y que sólo cuando encierra energía suficiente consigue afectarla abrillantándola.

De lo expuesto se deduce que la observación de este fenómeno habrá de realizarse en ciertas longitudes de onda. Lo que requiere el auxilio de unos medios técnicos que superen los telescopios empleados para la captación de luz blanca, como se venía realizando desde los tiempos de Galileo. A finales del siglo pasado, comienzan ya a adaptarse los espectrógrafos tradicionales a la astronomía solar (espectroheliógrafo); un barrido de la ranura a través del disco solar proporcionaba una imagen del mismo en determinada longitud de onda. Sin embargo, su complicación técnica, unida al tiempo que se tardaba en efectuar el barrido, los hacía poco útiles para la observación de fenómenos tan dinámicos como son las fulguraciones. El desarrollo a lo largo del decenio de 1940 de filtros birrefringentes formados por una serie alternada de polarizadores y placas de material birrefringente, como cuarzo o calcita, vino a aportar una solución cómoda y eficaz para la observación instantánea del Sol en cualquier longitud de onda. Se abría una etapa de estudio sistemático de las fulguraciones y otros fenómenos.

La línea espectral más utilizada para la observación de fulguraciones es la línea Balmer del hidrógeno neutro en 6563 angstrom, conocida como Hα, con la que nos situamos a nivel de la cromosfera. ¿Qué se aprecia? Tras la repentina aparición de algunos puntos brillantes, en menos de 10 minutos el brillo se ha extendido, en la llamada fase flash, hasta cubrir un área del orden de la superficie de la Tierra, valor que puede oscilar en un factor de 10. Este brillo se distribuye frecuentemente en dos bandas, a ambos lados de la llamada línea neutra que separa zonas de diferente polaridad magnética. En los minutos y horas siguientes, un lento declinar del brillo lo devuelve a su nivel original.

Las fulguraciones se caracterizan por ser fenómenos explosivos muy energéticos. En pocos minutos pueden calentar un volumen equivalente a 10 Tierras hasta 15.000 grados K a nivel cromosférico y hasta 20 millones de grados a nivel de la corona, así como acelerar partículas cargadas, electrones e iones por ejemplo, hasta 100 kiloelectronvolt e incluso hasta los 10 gigaelectronvolt. Un recuento de todas las formas en que se emite dicha energía nos lleva a cifrar en 10^{30} erg la cantidad emitida por una fulguración mediana.



ESQUEMA del sistema desarrollado en el IAC para alerta fotométrica de fulguraciones. La señal luminosa procedente del Sol en luz integral, después de pasar por el sistema óptico de un telescopio de 25 centímetros de apertura, atraviesa un filtro birrefringente operando en la línea H-alpha y llega a la superficie fotosensible de un vidicón, donde se puede detectar la cromosfera total o parcialmente. Mediante unos selectores de área podemos obtener elementos de tamaño variable, uno de los cuales será el correspondiente al área bajo estudio a la que denominaremos "señal" y otro el de la cromosfera no perturbada ("referencia"). Cuando la diferencia señal-referencia sobrepase un valor umbral preestablecido, indicativo de que ha comenzado una fulguración, se disparará un programa de observaciones.

Para una visión completa del fenómeno, no basta con la descripción dada para una determinada altura. Podemos elevar todavía más, hasta unos 10.000 kilómetros, la capa en observación cuando utilizamos luz ultravioleta o rayos X. Debido a la eficaz protección que nos proporciona nuestra atmósfera, este tipo de observaciones sólo pueden ser realizadas fuera de ella, desde satélites artificiales. Los observatorios solares orbitales y especialmente el Skylab, en 1973, consiguieron imágenes de las fulguraciones en rayos X, en las que el brillo aparece muy concentrado, coincidiendo aproximadamente con el centro geométrico de las zonas brillantes observadas en Hα. Característica notable de la emisión de rayos X es que precede en decenas de segundos al brillo cromosférico.

La emisión en radio de las fulguraciones, detectada ya por los primeros radares, se produce por mecanismos asociados a ondas del plasma solar. Una importante propiedad de los plasmas, que también los diferencia de los otros gases no ionizados, es su tendencia a actuar en bloque, y cuya explicación hay que buscarla en el tipo de fuerzas que en él operan. Esa propiedad le permite oscilar como una gelatina cuando es perturbado; se muestra muy adecuado para la propagación de muchos tipos de ondas. En los momentos iniciales de la fulguración, por ejemplo, y coincidiendo con estallidos de rayos X, se aceleran chorros de partículas cargadas que en su trayecto hacia el exterior inducen oscilaciones en los plasmas que atraviesan. Las frecuencias de tales oscilaciones dependen de la densidad del medio y producen emisión de radio de frecuencia decreciente conocida como estallido de tipo III.

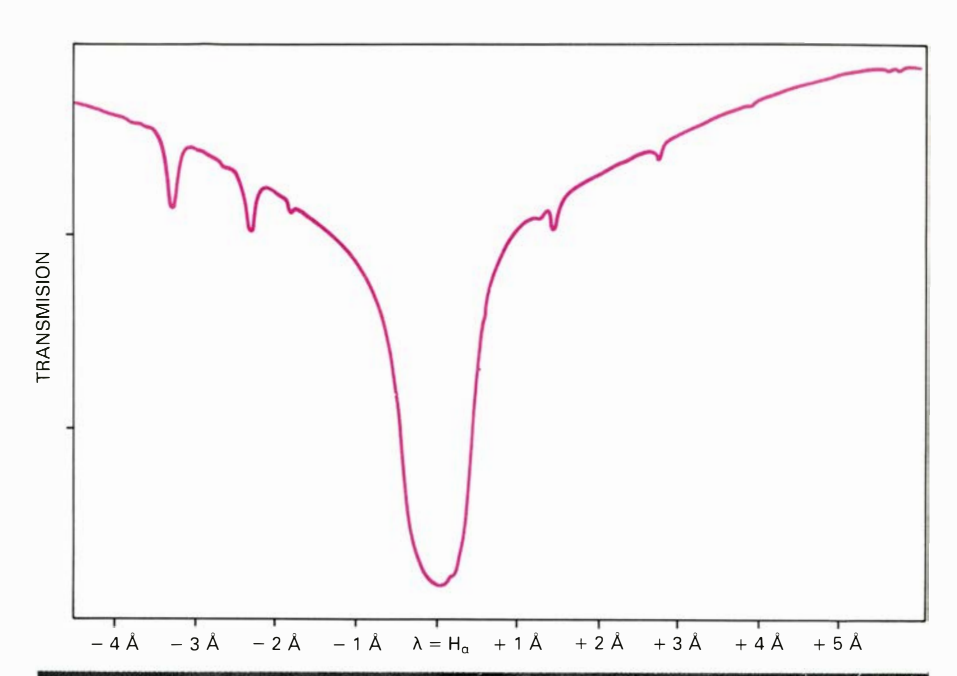
Al cabo de unos minutos, aparece otro tipo de emisión de radio, el estallido de tipo II. Nace de la expansión de una onda de choque que, originada en la fulguración, viaja en todas direcciones a través del plasma circundante al que hace oscilar. En este mismo capítulo de la emisión de radio, aparte de la de origen térmico asociada al plasma caliente, se observa también la radiación sincrotrón, producida por electrones que giran alrededor de las líneas de campo magnético.

Las fulguraciones resultan, pues, de extraordinaria complejidad, con múlti-

ples fenómenos asociados, gran variedad de casos distintos y casi otros tantos mecanismos físicos propuestos por los teóricos de la física solar para su explicación.

La historia de una fulguración típica podría ser la siguiente: se produce en una región activa, probablemente con manchas (85 por ciento de los casos). Una hora antes de ocurrir, las estructuras magnéticas o relacionadas con los campos magnéticos, como filamentos en la línea neutra, se encuentran ya en agitación, mostrando cambios y fuertes gradientes de intensidad del campo. En un cierto instante y en una pequeña zona (≈ 3000 kilómetros) situada en la baja corona se registra una descarga de rayos X penetrantes; en cuestión de segundos las zonas inferiores se ven afectadas por una descarga de energía, que se manifiesta principalmente en dos bandas situadas a ambos lados de la fuente de rayos X, como a los pies de hipotéticos (o reales) arcos cuyo punto más alto coincidiera con dicha fuente. Durante esta fase se aceleran partículas cargadas, se calienta el plasma hasta temperaturas muy altas (del orden de varios millones de grados K) y se lanza materia al espacio. Según la velocidad que lleve con respecto a la velocidad de escape del Sol, la materia eyectada volverá a caer a la superficie o bien saldrá hacia el espacio interplanetario.

Horas después de la fulguración se relaja la estructura magnética de la zona, con gradientes de intensidad mucho menores. La onda de choque producida durante la explosión, además de propagarse hacia el espacio interplanetario, lo hace por la propia superficie solar, dando lugar, en ocasiones, al disparo de otras fulguraciones en lugares alejados.



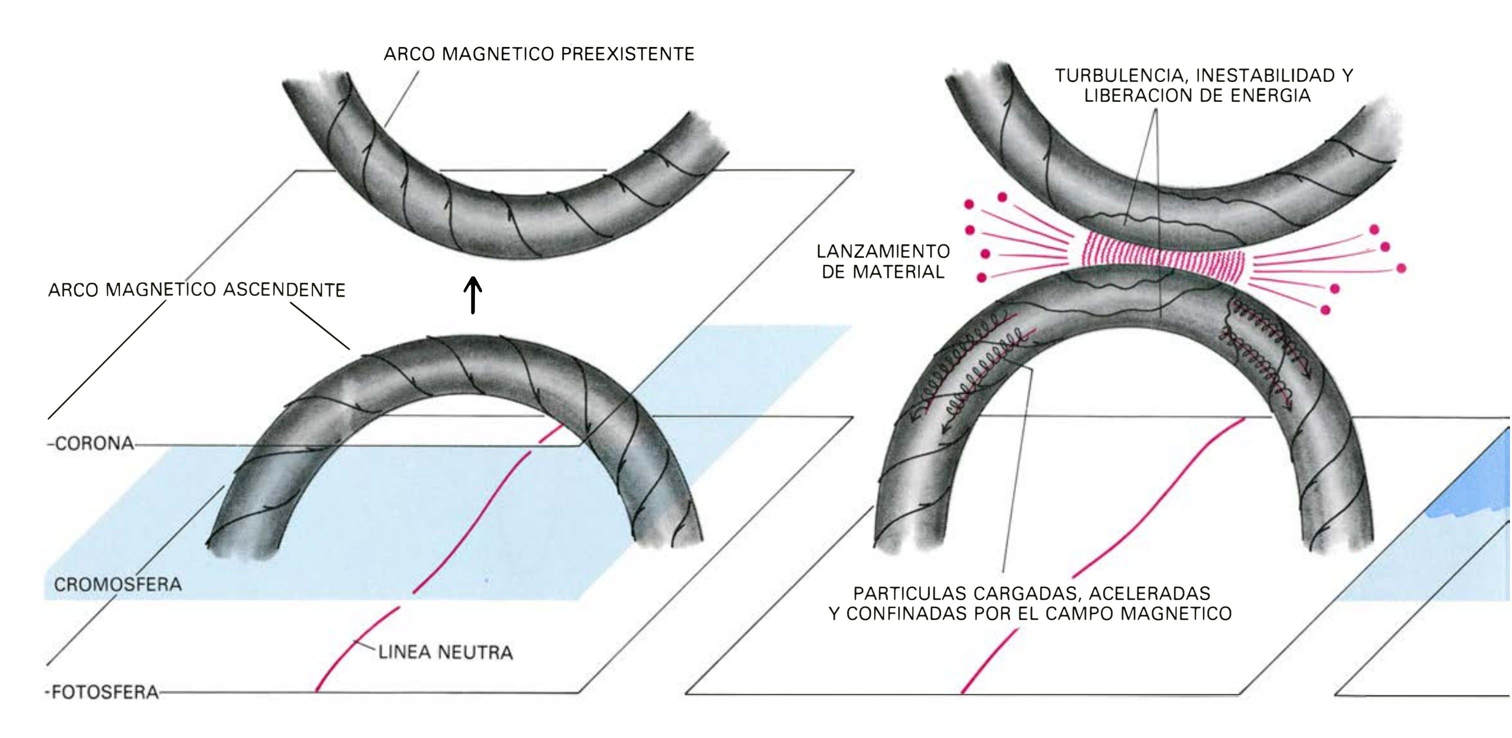


EN LA LINEA H-ALPHA del hidrógeno neutro (6563 angstrom) se han venido observando las fulguraciones desde el descubrimiento del filtro birrefringente por Lyot en 1933. Dicho instrumento, compuesto por una serie alternada de polarizadores y elementos birrefringentes, nos proporciona imágenes del Sol casi monocromáticas. Teniendo en cuenta que el centro de una línea espectral en la atmósfera solar se forma a mayor altura que las alas, mediante desplazamientos del centro de la curva de transmitancia del filtro con respecto a la línea solar, se puede obtener información sobre las diversas capas de la atmósfera solar. En la fotografía, tomada por los autores, vemos el aspecto de una fulguración en el centro de dicha línea. La fulguración, observada el 3 de julio de 1974 en el Observatorio del Teide, fue altamente energética con emisión de protones, que produjo diversos efectos en el campo magnético terrestre.

¿Cómo se almacena la energía que se libera en las fulguraciones? ¿Cuál es el mecanismo de disparo? ¿Tiene o no un origen térmico la energía electromagnética? Ya hemos señalado que la presencia de campos magnéticos en el Sol es capaz de derivar parte de la energía general hacia puntos de concentración. Veamos ahora cómo. Ocurre que, en los plasmas sometidos a la acción de campos magnéticos, cualquier intento de fluir transversalmente a las líneas de dicho campo queda en seguida anulado por la aparición de corrientes inducidas que actúan oponiéndose a las originales; el único movimiento permitido es el que procede a lo largo de las líneas: se dice entonces que plasma y campos magnéticos se encuentran congelados.

Un finísimo chorro de tinta introducido en un líquido que fluye nos valdría de ejemplo de esa congelación, ya que la línea de tinta se verá sometida a todas las variaciones por torcimientos, curvaturas, etcétera, que se apliquen al fluido. Los campos magnéticos quizá no fueran tan pasivos como nuestra línea de tinta, y en vez de dejarse arrastrar podrían ser ellos los que impusieran la trayectoria a seguir por el plasma cuando la densidad de energía magnética superase la de energía térmica del plasma.

A pesar de la tendencia a repelerse que tienen las líneas de campo magnético de igual polaridad, los movimientos del plasma, tales como rotación y convección, son suficientemente ordenados e intensos en algunos lugares como para contrarrestar dicha repulsión; comprimen entonces las líneas del campo magnético y forman cordones o tubos de flujo magnético, de suerte que el trabajo realizado para producir la compresión queda almacenado en forma de energía potencial magnética. (De modo análogo a como se almacena energía potencial elástica en una tira de goma que comprimimos o torcemos.) Estos tubos de flujo tienden a flotar hacia la superficie, dando lugar a las regiones



TUBOS DE CAMPO MAGNETICO Y PLASMA, a los que está asociada la fulguración. Por su complejidad, tales tubos almacenan gran cantidad de energía potencial (*izquierda*). Antes de la fulguración, un arco magnético ascendente se encuentra con otro ya existente, de polaridad opuesta. De la colisión de ambos arcos (*centro*), se produce una zona de fuertes corrientes eléctricas; emisiones repentinas e intensas de rayos X marcan el origen de la fulguración. Al mismo tiempo se produce la expulsión de gran cantidad de material y partículas cargadas. De las partículas cargadas aceleradas, la mayoría quedan confinadas por los campos magnéticos, escapando algunas hacia el exterior, mientras el resto son conducidas hacia los pies de los arcos.

activas y a las manchas solares, que no son otra cosa que la sección de estos tubos con diámetros de unos 20.000 kilómetros e intensidades de campo magnético de varios miles de gauss, cifra a la que se suele llegar entre los polos de un potente electroimán.

A los investigadores del plasma en el laboratorio les resulta muy difícil obtener una configuración mínimamente estable en la que desarrollar reacciones de fusión controlada. En el Sol encontramos frecuentemente manchas y otras estructuras que presentan vidas de varios meses, lo que revela que allí se ha logrado un equilibrio estable entre campos magnéticos y plasmas. Otras veces, ciertas estructuras presentan equilibrios inestables, en los que cualquier perturbación es capaz de desencadenar un proceso explosivo de alejamiento de ese equilibrio.

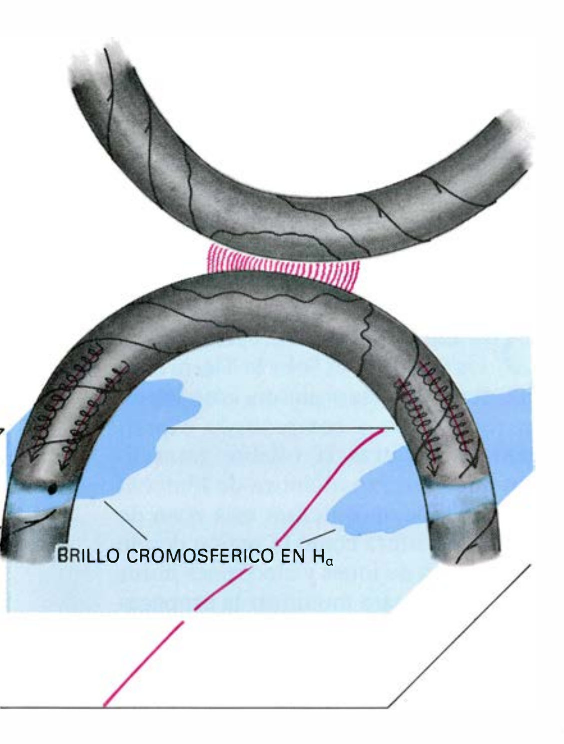
Las cifras y la observación de las fulguraciones apoyan la hipótesis de un almacenamiento magnético de la energía. Por un lado, el contenido de energía térmica en el volumen afectado por la fulguración se queda corto por un factor de un millón y, por otro lado, debe descartarse un origen termonuclear habida cuenta de la rarísima observación de flujo de neutrones. Ahora bien, la energía que puede ser almacenada por un campo magnético realista en el volumen señalado supera con holgura los 10^{30} erg normalmente emitidos, a condición de que dicho campo presente algún tipo de torcimiento o complejidad topológica.

El problema del almacenamiento de energía quedará como sigue: los campos magnéticos, tanto en el interior como en la superficie solar, van tomando energía mecánica de los movimientos del plasma y con ello aumentan su energía potencial al crecer su complejidad, adoptando configuraciones en equilibrio inestable, susceptibles de verse alteradas por cualquier perturbación y liberando entonces explosivamente la energía acumulada. Tras esta liberación, el campo adoptaría configuraciones más relajadas con menor potencial, que es lo que confirman las observaciones.

Menos acuerdo existe en lo concerniente al mecanismo capaz de disparar la inestabilidad. Aunque se han propuesto varios modelos, algunos de ellos pueden funcionar a la vez sin necesidad de excluirse mutuamente. Uno de los modelos que mejor se ajusta a las observaciones considera la situación, nada extraña en la superficie solar por otra parte, en la que dos regiones de polaridad magnética opuesta coincidan espacialmente, quedando entre ellas una lámina neutra con plasma. Debido a la atracción entre líneas de signo opuesto del campo magnético se producirá una fuerte presión sobre el material de la lámina, que se vería lanzado hacia fuera, igual que ocurriría con el material existente entre dos placas fuertemente magnetizadas que se atrajeran mutuamente en el interior de un líquido. En el Sol, este material está cargado eléctricamente y se producirán fuertes corrientes, que comenzarán a producir las primeras inestabilidades en los campos magnéticos. A partir de entonces todo ocurre en cadena, ya que estas inestabilidades crean turbulencias que ponen en contacto más líneas de campo opuestas, se producen más corrientes, nuevas inestabilidades, etcétera. Ejemplos realistas de estas situaciones son la emergencia de nuevo flujo magnético en una región activa preexistente, la ascensión hidrodinámica de un tubo de flujo que colisiona con otros, el acercamiento entre regiones activas de no muy diferente latitud y la propia complejidad de los campos magnéticos de una región que pone en contacto a los de signo opuesto.

La tercera de las preguntas planteadas –¿tiene o no un origen térmico la energía electromagnética?– carece por el momento de respuesta única. Dos modelos muy distintos se disputan la explicación del origen térmico o no térmico de la radiación que recibimos de las fulguraciones.

Es fácil averiguar si la radiación electromagnética que recibimos de un lugar ha tenido su origen en un cuerpo caliente o bien en procesos de aceleración o desaceleración de partículas cargadas. Para ello estudiamos el espectro de



Cuando estos chorros de partículas encuentran capas más densas, como la cromosfera (*derecha*), producen un gran aumento de temperatura y por ende un gran brillo que se observa en Hα como dos manchas a ambos lados de la línea neutra.

la radiación recibida. Una distribución de la energía con la frecuencia similar a la de un cuerpo negro investigado por Planck nos lleva a la conclusión de un origen térmico para esa radiación. Por el contrario, un espectro que no cumpliera esa condición indicaría probablemente que el origen de la radiación nada tiene que ver con la temperatura del medio de donde proviene, sino con los procesos de aceleración ya mencionados; habría que llamarla, pues, no-térmica. La radiación de sincrotón y los rayos X utilizados en medicina son producidos por procesos de este segundo tipo.

En las fulguraciones, siempre se observa radiación térmica originada por el plasma calentado; pero en muchos casos también se observan los estallidos de rayos X y de radio de tipo no-térmico. El intento de explicar estos estallidos no-térmicos lleva a proponer un modelo en el que un potente chorro de electrones creado en el momento del disparo en lo alto del sistema de arcos se ve canalizado por los mismos hasta chocar con las zonas inferiores más densas, donde se registra el brillo en Hα. Este proceso sería análogo a un receptor de televisión en el que campos eléctricos (o campos magnéticos variables) acelerasen los electrones que fueran a chocar contra la pantalla, produciendo brillo y calentándola; la atmósfera solar desempeñaría el papel de dicha pantalla. El punto débil de este modelo reside en su incapacidad por aportar un mecanismo de producción del hipotético chorro de electrones.

Otros modelos suponen un origen térmico para toda la radiación emitida. En este caso, el plasma sería calentado simplemente por el efecto Joule de las fuertes corrientes eléctricas a su paso por capas de resistividad no nula. Nos hallaríamos ante una situación análoga a la que se produce con el brillo del filamento de una bombilla al paso de una corriente eléctrica. Para este modelo, el espectro no térmico de los estallidos lo sería sólo en apariencia y como resultado de la superposición de varias curvas de emisión térmica.

La razón de que no se haya resuelto todavía ese enojoso dilema obedece a la falta de observaciones en los momentos iniciales en que se produce una fulguración. Cuando el observador se da cuenta de que en algún punto del disco solar se produce una fulguración, ha perdido ya, generalmente, la oportunidad de captar los momentos iniciales y los precedentes. A fin de no dejar ese importante momento de la observación en manos de la suerte, uno de nosotros (Félix Herrera) ha desarrollado en el Instituto de Astrofísica de Canarias un sistema de alerta fotométrico adaptado a un telescopio solar de 25 centímetros de apertura. Merced al sistema, cualquier pequeño aumento de brillo en el disco solar, indicativo del inicio de una fulguración, dispara automáticamente un programa de observación rápida en el que se capta, con alta resolución temporal, todo el desarrollo del fenómeno.

Otro aspecto importante de la fulguración es la perturbación que produce en el medio interplanetario y, en concreto, en el entorno de nuestro planeta. Para su descripción consideraremos el paso de la emisión por las diferentes regiones afectadas. Teniendo en cuenta que la corona presenta temperaturas del orden del millón de grados, los iones y electrones más energéticos pueden escapar a la gravedad solar. La corona se extiende así por el medio interplanetario en lo que se conoce por "viento solar".

Sin alejarnos de las cercanías del Sol, los campos magnéticos de éste hacen racheado ese flujo, produciendo corrientes de alta (hasta de 800 kilómetros por segundo) y baja velocidad, según las líneas de campo sean abiertas o cerradas. A partir de la distancia en que la densidad de energía magnética ha decrecido por debajo de la del plasma, las líneas de dicho campo se ven arrastradas y forman el "campo magnético interplanetario".

Al producirse una fulguración en el Sol, una nube de partículas cargada de alta velocidad se ve lanzada hacia el exterior, perturbando a su paso el medio interplanetario. Esta propagación sobre un viento solar de menor velocidad produce una capa de plasma comprimido precedida por una onda de choque. El tiempo y la forma en que estas nubes de partículas puedan afectar a la Tierra dependen de la energía de las partículas y de la situación del fenómeno en la superficie solar. Los llamados "rayos cósmicos solares", formados sobre todo por protones y partículas alfa de alta energía (entre decenas y miles de millones de electronvolt), llegan a la Tierra entre media y una hora después de la fulguración. La nube masiva de partículas de baja energía tardará más de un día en recorrer la distancia que le separa de nosotros.

Por otro lado, no siempre se encuentra la Tierra en la posición adecuada para recibir la nube de partículas producida por la fulguración. La razón es estrictamente geométrica: si bien el viento solar y el campo magnético deberían presentar una estructura radial a partir de unos 20 radios solares, la rotación del Sol los deforma en una espiral. La fulguración en mejor posición para afectar a nuestro planeta sería aquella que se produjera en la base de una hipotética línea de esa espiral que pasara por la Tierra. De esta clase suelen ser las fulguraciones que observamos en el lado oeste del disco solar. La Tierra no se encuentra indefensa ante esta peligrosa lluvia de partículas cargadas y radiaciones energéticas. Posee varias capas de protección, como la magnetosfera o la ionosfera, fuentes, a su vez, de variados y complejos efectos secundarios.

Definimos la magnetosfera como la zona donde las partículas, principalmente cargadas, quedan controladas por el campo magnético de la Tierra. La asimetría de su aspecto se debe a la acción del viento solar sobre el campo magnético dipolar, comprimiéndolo en un lado y alargándolo en forma de cola por el otro. Además del plasma contenido por la magnetosfera, el pequeño satélite *Explorer I* descubrió en 1958 dos zonas situadas a unos 4000 kilómetros y 24.000 kilómetros del ecuador terrestre, cuya radiación saturó los contadores Geiger que portaba. Estudios posteriores explicaron las características de las mismas como parte de dos cinturones (llamados de Van Allen) donde se encuentran atrapadas partículas muy energéticas. El más exterior está formado sobre todo por electrones

de hasta 1 megaelectronvolt y el interior por protones en el rango de 10-100 megaelectronvolt.

Como ya se ha señalado, la primera oleada de partículas procedente de una fulguración importante es la de rayos cósmicos. Tras un primer impacto, esos rayos inducen, en la alta atmósfera, desintegraciones nucleares y radiación cósmica secundaria, que pueden detectar los medidores de física nuclear (como el monitor de neutrones), constituyendo el llamado "efecto a nivel del suelo" (GLE). Estos protones de alta energía representan el mayor peligro en los vuelos espaciales, para los astronautas y para ciertos instrumentos, que pueden ser dañados; por cuyo motivo hay que darles la protección adecuada. También deben ser tenidos en cuenta en los vuelos de pasajeros a gran altura.

Varias horas después de la primera oleada, llega la nube de partículas de menor energía. Esta produce interacciones más profundas con la magnetosfera. En primer lugar, la mayor presión cinética que ejerce la nube sobre la magnetosfera le causa una compresión adicional, y, por consiguiente, un incremento de la intensidad del campo geomagnético detectada en la superficie de nuestro planeta. Horas más tarde, sin embargo, una inyección de partículas energéticas de los cinturones de Van Allen, procedentes al parecer de la cola magnética, provoca una circulación o corriente eléctrica en los mismos, que se refleja en una disminución del campo geomagnético, seguida de una posterior recuperación que puede durar dos o tres días. A esta cadena de fenómenos se le llama tormenta magnética.

En los puntos de la magnetosfera que se encuentran alrededor del eje magnético de la Tierra (polos magnéticos norte y sur) la resistencia que los campos magnéticos pueden ofrecer al flujo de viento solar es casi nula, por carecer de componente transversal a dicho flujo. En ese sentido, estas zonas, llamadas neutras, actúan de sumideros o puntos débiles por donde las partículas de baja energía pueden llegar con facilidad hasta la baja atmósfera.

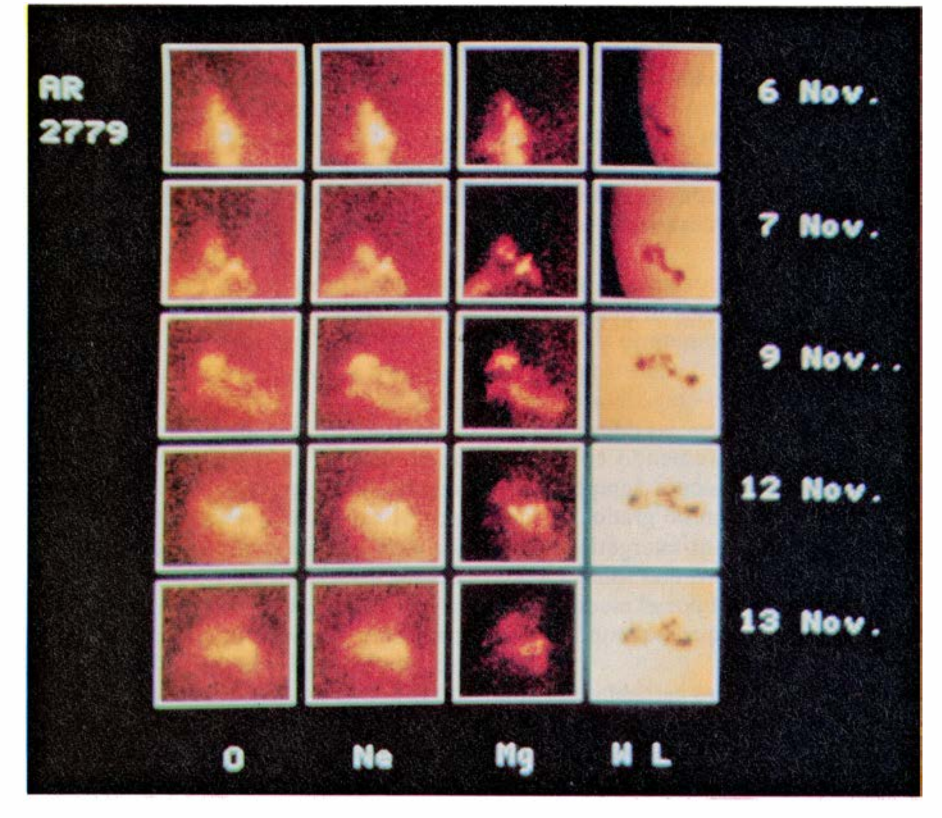
Tras una fulguración, las partículas cargadas procedentes del Sol y otras originadas en la propia magnetosfera convergen hacia las zonas neutras, que sobre la Tierra corresponden a óvalos situados a unos 23 grados alrededor de los polos magnéticos. Antes de llegar al suelo, a unos 100 kilómetros de altura, las partículas excitan átomos de oxígeno y moléculas de nitrógeno causando las bellas emisiones de colores rojo y verde que caracterizan a las auroras. Durante las tormentas magnéticas las zonas aurorales se extienden, desplazándose sus centros hacia latitudes más bajas, como se resaltó en la observación con la que abrimos este artículo.

Otra zona de importancia en las relaciones entre el Sol y la Tierra es la ionosfera, el primer plasma cósmico en ser reconocido y comprobado experimentalmente tras la célebre transmisión de radio transatlántica de Marconi en 1901. Podemos definir esta zona de la alta atmósfera como la región donde la presencia de iones y electrones libres es suficiente para modificar la propagación de ondas de radio. Al ser causada la ionización por la incidencia de la radiación solar, la densidad de electrones y, en definitiva, la estructura de la ionosfera dependerán de factores tan diversos como la hora del día, estación del año, ciclo solar y otros.

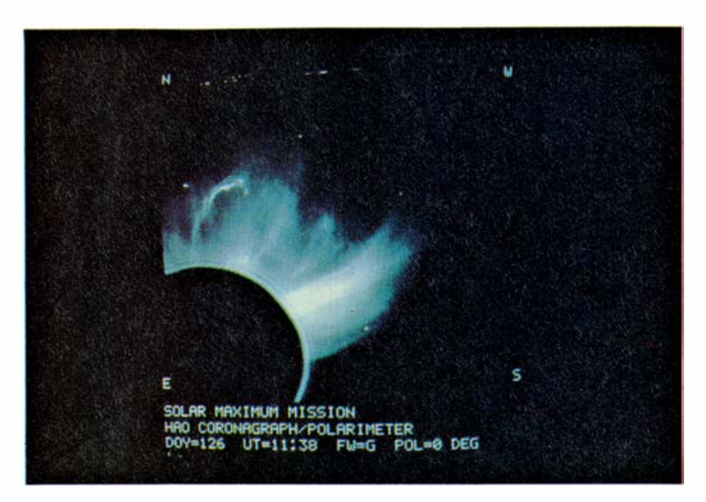
El estudio de la estructura ionosférica puede realizarse aprovechando la interesante propiedad de la reflexión de ondas de radio. Según la teoría de ondas, cuando el seno del ángulo de incidencia en la capa reflectante es igual al índice de refracción relativo de dicha capa, se obtiene una reflexión total de la onda. Conocida la dependencia del índice de refracción con la frecuencia de la onda y la densidad local de electrones, la geometría de la reflexión nos proporciona información sobre dicha densidad electrónica. Estudios de este tipo distinguen claramente tres capas diferenciadas, denominadas *D, E* y *F*. (En todas ellas hay otras capas esporádicas o inhomogeneidades.)

Las propiedades y diferencias entre las capas están determinadas por la variación en la composición y densidad de la atmósfera, los procesos de producción y recombinación de iones, la intensidad de la radiación solar, entre otros factores. Así, la capa *D* (entre 50 y 90 kilómetros de altura) tiene su fuente principal de ionización en la radiación ultravioleta sobre el óxido nítrico, la capa *E* (entre 100 y 140 kilómetros) la tiene en rayos X poco energéticos que ionizan el oxígeno molecular y, por último, la capa *E* (desde 140 kilómetros) es el resultado de la ionización de oxígeno y nitrógeno atómicos causada por radiación todavía más energética.

Como se ve, la principal fuente de perturbación de la ionosfera se encuentra en la radiación electromagnética de alta frecuencia de la fulguración (ultravioleta y rayos X), que, al incidir sobre



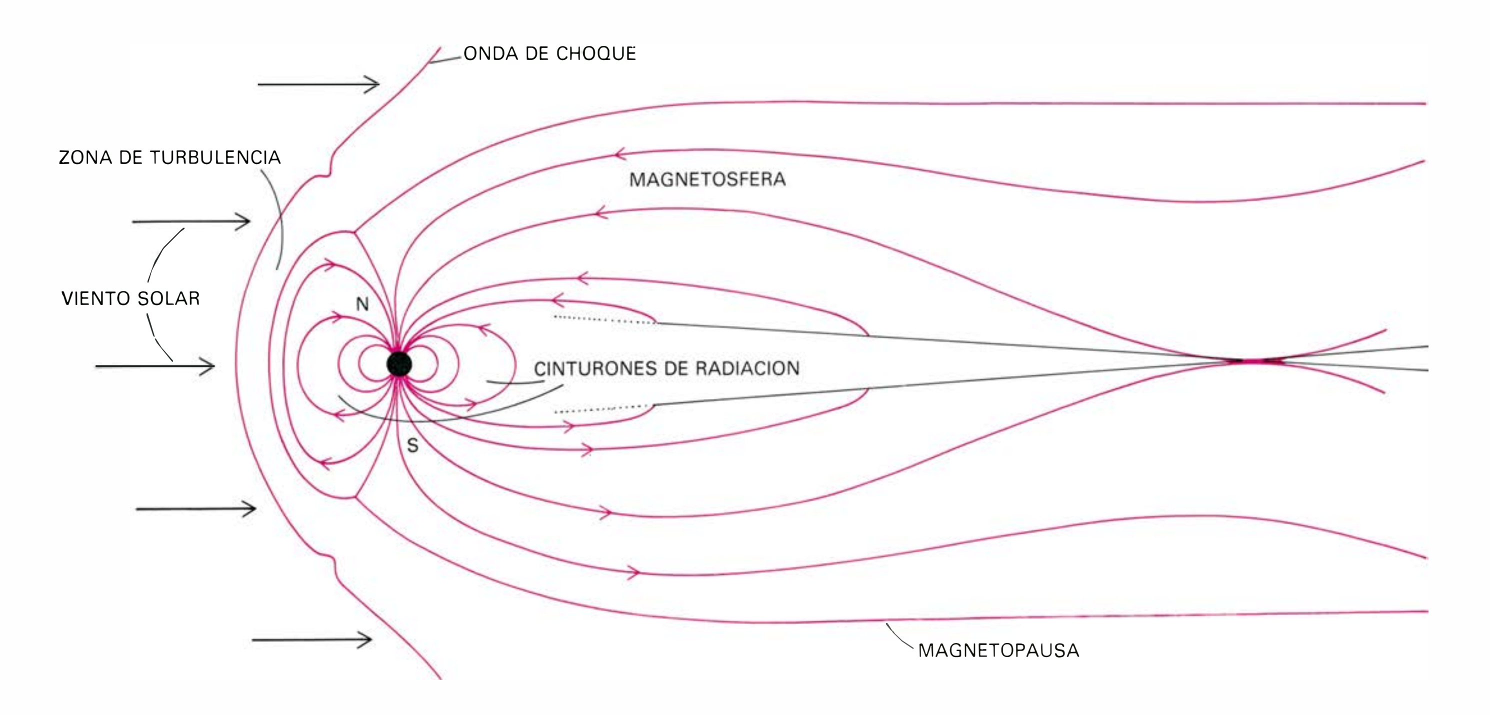
UNA REGION ACTIVA DEL SOL es el resultado de la aparición e interacción de flujo magnético, del orden de 10^{22} maxwell, con el plasma de las capas exteriores. La interacción desencadena una serie de fenómenos, entre los que se encuentran las fulguraciones. La opinión general es que este flujo magnético sube hasta la superficie por flotabilidad. Emerge desde capas profundas, donde se ha amplificado a través de un proceso electromagnético análogo al que trabaja en las dinamos en los automóviles y bicicletas. La ilustración ofrece la evolución de una de tales regiones en luz ultravioleta de 3 iones (oxígeno, neon y magnesio), así como en luz blanca (WL). Las observaciones fueron efectuadas desde el satélite SMM con el policromador de rayos X (XRP), construido por Appleton Laboratory y Mullard Laboratory of University College en Inglaterra y por el Lockheed Palo Alto Research Laboratory. (Cortesía de C. J. Wolfson.)





FENOMENO CORONAL TRANSITORIO registrado por el coronógrafo/polarímetro, a bordo del satélite SMM, el 5 de mayo de 1980. A la izquierda, la imagen de la corona aparece en luz integral y, a la derecha, esa misma imagen procesada por ordenador para resaltar (con colores no reales) las zonas de diferente densidad de material: máxima en el violeta y decreciendo hacia el exterior. Parte del disco solar ocupa el extremo inferior izquierdo de cada imagen. En medio de una gigantesca estructura en arco mostrada parcialmente en la figura, puede apreciarse una erupción de material perteneciente a un filamento. Las inestabilidades producidas durante las fulguraciones en los campos magnéticos que soportan un filamento producen una ascensión explosiva del mismo, con velocidades de 700 kilómetros por segundo en este caso. El material expulsado en algunas fulguraciones representa más energía cinética que la radiada en todo el espectro electromagnético, mientras que en otras no se han observado perturbaciones en la corona. Este y otros son los nuevos interrogantes con que se enfrentan los físicos solares al interpretar los datos recogidos a lo largo del programa Solar Maximum Year (Fotos NASA).

FULGURACION vista desde el satélite SMM en la luz del Mg XI (magnesio diez veces ionizado). Representa la emisión de rayos X del plasma de la corona a unos 6 millones de grados. El blanco corresponde a la emisión más intensa, seguida por el amarillo y negro. Punto importante de las investigaciones desde el espacio es el descubrimiento de la estructura filamentaria en forma de lazos de las fulguraciones, propagándose así el abrillantamiento de una a otra de tales estructuras. Tales lazos brillantes en rayos X corresponden a un puente entre las dos áreas de emisión en H-alfa localizadas en lados opuestos del campo magnético longitudinal. (Foto publicada por cortesía de Wolfson: SMM - XRP Experiment-Lockheed Palo Alto Research Laboratory.)



LA FORMA DE LA MAGNETÓSFERA viene determinada por la incidencia del viento solar en el campo magnético bipolar terrestre. En la parte diurna, el campo queda comprimido; al ser el viento solar altamente supersónico, se forma una onda de choque delante de la magnetosfera, separada de ella por una zona de turbulencia. Detrás de la Tierra, las líneas de fuerza son arrastradas en forma de larga cola magnética; algunas son cerradas y otras abiertas. Las líneas abiertas conectan en algún lugar con el campo interplanetario y sirven para definir el borde de la magnetosfera o magnetopausa. Los cinturones de radiación constituyen zonas de confinamento magnético de partículas energéticas. No así las zonas neutras, que forman los puntos débiles por donde penetran las partículas cargadas procedentes de la fulguración, causantes del fenómeno de las auroras. Otro importante efecto de la fulguración es la tormenta magnética, originada por un aumento brusco de la compresión del campo y una penetración de partículas cargadas en la magnetosfera.

las diferentes capas, produce un aumento de ionización y, por tanto, un cambio en sus propiedades reflectantes y absorbentes respecto a las ondas de radio. Estos efectos sólo tardan en manifestarse los 8,5 minutos que invierte la luz en viajar desde el Sol hasta la Tierra.

Las capas altas *E*, *F*, responsables de la reflexión de las ondas cortas, presentan el fenómeno de la "desviación repentina de frecuencia" (SFD) cuando se aumenta su nivel de ionización.

La importancia de la capa *D* radica en ser la responsable de la reflexión de ondas largas (VLF y LF), además de causar la atenuación de las ondas cortas que se reflejan en las capas superiores. En general, los efectos causados por la ionización excesiva de esta capa se conocen como "perturbaciones ionosféricas repentinas" (SID), entre las que podemos destacar el "desvanecimiento de señales de onda corta" (SWF) por un lado, y, por otro, en lo que se refiere a ondas de VLF, el "aumento repentino de señales" (SES) y el "aumento repentino de atmosféricos" (SEA), consecuencia ambos del mejoramiento de las propiedades reflectoras de la capa *D*.

Otra consecuencia de la fulguración es el aumento de la absorción en las frecuencias de VHF, utilizadas en televisión y frecuencia modulada, servicios de seguridad, aviación, etcétera, cuyo modo de propagación es por dispersión en la capa *D* e inhomogeneidades de la capa *E*, aunque normalmente el medio fundamental de propagación sea en línea recta.

Efectos secundarios de las fulguraciones en los que interviene la ionosfera son los llamados "efectos de las fulguraciones solares" (SFE), que se manifiestan como cambios en el campo geomagnético inducidos por fuertes corrientes eléctricas a la altura de la capa *E*. Señalemos, por último, la "absorción en los casquetes polares" (PCA), que afecta en latitudes altas a las ondas cortas y es consecuencia del exceso de ionización que producen los protones de baja energía en la capa *D*, cuando penetran por los puntos neutros de la magnetosfera.

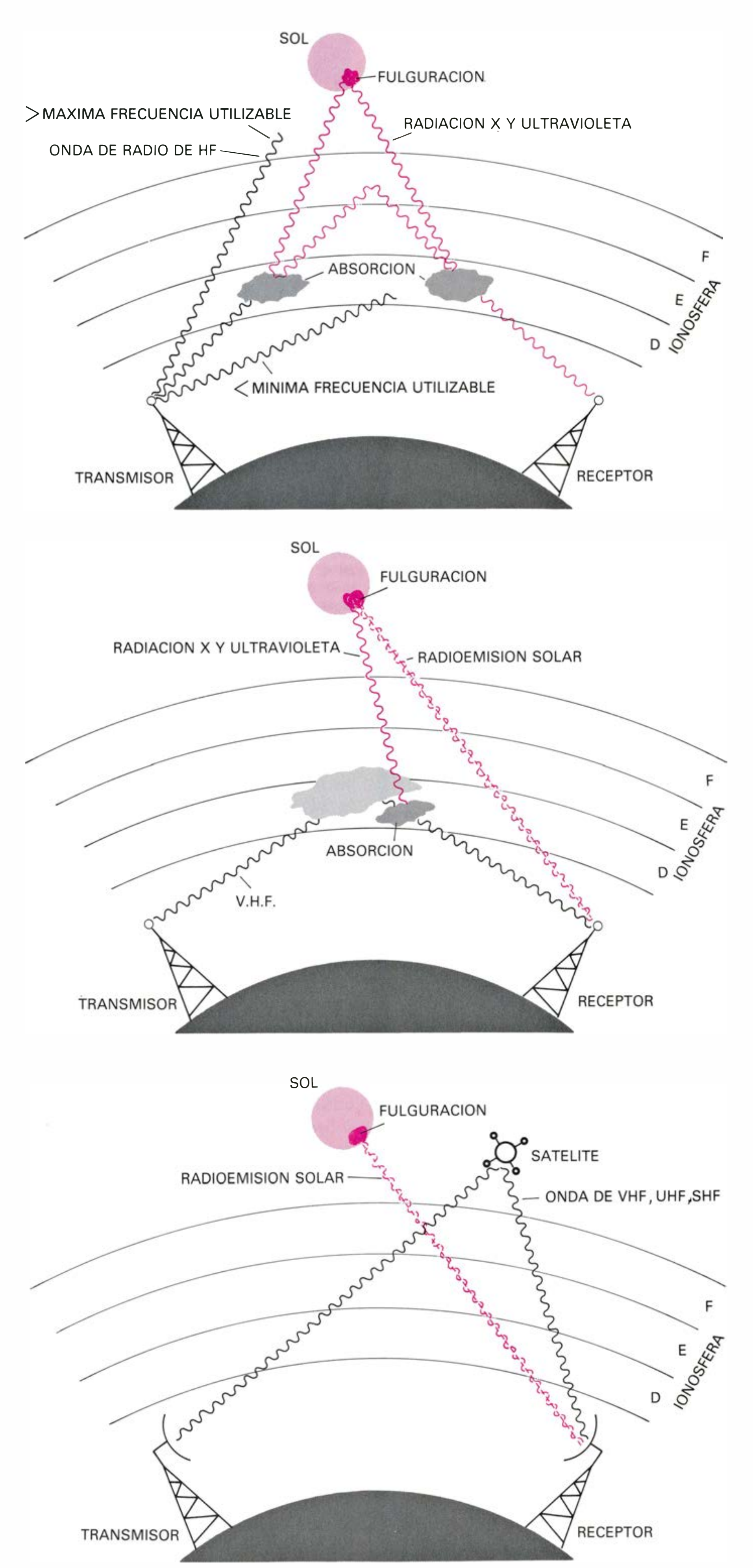
La complejidad de una fulguración exige que se la estudie desde múltiples flancos a la vez: magnetómetros, telescopios ópticos y radiotelescopios, instrumentos que raramente se encuentran en un mismo observatorio. Atendiendo a esa característica, así como a los resultados de la creciente y positiva cooperación internacional en el terreno de la física solar, H. Zirin, director del Observatorio de Big Bear en Estados Unidos, propuso en 1978 la idea de desarrollar un amplio programa internacional con participación de los principales observatorios del mundo, apoyados por observaciones desde el espacio, que culminara en 1980, año en que se produciría un máximo de actividad solar del ciclo de 11 años. El proyecto, bautizado "Solar Maximum Year" (año máximo solar), recibió un amplio apoyo y 63 observatorios ofrecieron su participación. Por España intervino el Instituto de Astrofísica de Canarias, que aportó la utilización de dos telescopios de 40 y 25 centímetros de apertura que trabajaban en la línea de Hα, situados en el Observatorio del Teide en la isla de Tenerife.

Una de las novedades más interesantes del programa fue la participación de un satélite artificial (Solar Maximun Mission) dedicado, casi por entero, a la observación de fulguraciones, que la NASA puso en órbita terrestre en febrero de 1980. Este satélite, perteneciente a una nueva generación en el que su construcción modular permite sustituciones y reparaciones en el espacio, llevaba seis instrumentos capaces de observar el Sol en muy diferentes frecuencias, aunque evidentemente con preferencia sobre las que no podían ser recibidas en la Tierra: ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Estas frecuencias, por otro lado, son las que más información aportan sobre las capas superiores, donde se origina la fulguración. En el extremo de altas frecuencias poseía un espectrómetro de rayos gamma capaz de estudiar los mecanismos de aceleración de nucleones y electro-

nes en las contadas fulguraciones con energía suficiente para producir esas radiaciones. En la zona de rayos X portaba dos espectrómetros de rayos X duros (entre 3,5 y 300 kiloelectronvolt), de los que uno de ellos producía una imagen de la región emisora y el otro captaba los estallidos iniciales, que servían, además, para alertar a los otros instrumentos del inicio de la fulguración. Un policromador de rayos X blandos estudiaba las condiciones físicas de las zonas de la corona donde se iniciaba el fenómeno. En el rango del ultravioleta, contaba con un espectrómetro/polarímetro que medía campos magnéticos y velocidades en las zonas por encima de la fotosfera. En el rango del visible, disponía de un coronógrafo, instrumento, que por medio del bloqueo artificial del disco solar producía un eclipse que permite el estudio de la corona. Aunque en algunos observatorios terrestres existían instrumentos de este tipo, la dispersión de la luz solar por los átomos y moléculas de nuestra atmósfera no permitía obtener eclipses tan perfectos como desde fuera de ella.

El programa del SMY fue un éxito en lo que se refiere a la recolección de datos, a pesar de los fallos técnicos que al final del año 1980 terminaron por dejar fuera de servicio al observatorio orbital SMM. Podría decirse que el propio Sol colaboró, produciendo algunas de las fulguraciones más energéticas e interesantes que se conocen.

Un ejemplo valioso de la observación de una fulguración con diferentes instrumentos podría ser la ocurrida el 30 de abril de 1980. El espectrómetro de ultravioleta a bordo del SMM detec-



GRAN INFLUENCIA de las fulguraciones solares en lo concerniente a la propagación de las ondas de radio en la atmósfera terrestre. En circunstancias normales (*arriba*), las ondas cortas (HF) procedentes de un transmisor se refractan en las capas altas de la ionosfera, pero al producirse una fulguración la radiación X y ultravioleta originada en éstas aumentan el nivel de ionización de la capa *D* absorbiendo las mismas y dando lugar incluso al desvanecimiento completo de señales (SWF). Las frecuencias > ma.f.u. (máxima frecuencia utilizable) atraviesan la ionosfera propagándose por el espacio exterior y las mi.f.u. (mínima frecuencia utilizable) no llegan a refractarse. Las señales de VHF (*centro*), uno de cuyos modos de propagación es por dispersión ionosférica, se desvanecen en virtud del aumento de absorción; simultáneamente, la radioemisión originada en la fulguración puede interferir la recepción de las señales de VHF. Por último, las comunicaciones vía satélite (*abajo*), las cuales operan normalmente en frecuencias muy altas (SHF), sólo se verán afectadas seriamente cuando el satélite aparezca en tránsito sobre el Sol o muy cerca de éste (dentro de los lóbulos de radiación de la antena), dependiendo el grado de interferencia debido a la radioemisión solar de cuál sea la importancia real de la fulguración.



CAUSA PRINCIPAL DE LAS AURORAS es el viento solar, realzado por una fulguración, al incidir sobre la magnetosfera terrestre. Al igual que en las propias fulguraciones solares, la energía almacenada en el campo magnético se transforma en energía cinética de los electrones que, al colisionar con las moléculas de aire de capas situadas en la atmósfera superior, entre 100 y 200 kilómetros de altura, dan lugar a una emisión luminosa. Las líneas más brillantes son la 5777 angstrom del oxígeno atómico y 3914 angstrom del nitrógeno molecular. Presentan un amplio abanico de formas, brillo, color y tiempo de duración. Debido a que los polos magnéticos son las zonas más fáciles para la penetración de las partículas, las auroras aparecen a latitudes altas, por lo que se han conocido también con el nombre de luces nórdicas. (Fotografía publicada por cortesía de R. Eather, adscrito al norteamericano Boston College.)

tó un arco que se hallaba sobre la región activa; tras la ascensión de otro arco magnético inferior se desencadenó la fulguración con estallidos de rayos X detectados en el SMM. Poco después, desde los observatorios situados en la Tierra se observó en Hα una lengua de material a una gran altura. Medidas de radio permitieron calcular la intensidad de los campos magnéticos y datos del policromador de rayos X blandos informaron de una intensa turbulencia en el inicio de la fulguración. La reconstrucción de los hechos a la luz de este material sería la siguiente. Dos arcos magnéticos de unos 1500 gauss colisionaron a una altura de unos 15.000 kilómetros sobre la superficie solar, produciendo un chorro de electrones muy energéticos y un fuerte calentamiento (unos 20 millones de grados) que generó una intensa turbulencia. Tras esto, los electrones energéticos quedaron confinados por los campos magnéticos en una lengua que llegaba hasta unos 40.000 kilómetros sobre la superficie solar. La idea del choque de campos magnéticos opuestos como mecanismo de disparo de la fulguración recibió así un apoyo observacional con este ejemplo.

En otra fulguración ocurrida el 21 de mayo de 1980 aparecieron indicios de un origen no-térmico de la emisión de rayos X duros. En efecto, la emisión observada en este caso provenía de los pies de los arcos, no de la parte alta de los mismos. Se cumplían aquí las predicciones del modelo según el cual un chorro de electrones muy energéticos originados en la parte alta de los arcos es conducido por los campos magnéticos hasta las capas inferiores de gran densidad que actúan como blanco de los impactos y origen de la emisión.

A pesar de su gran tamaño e intensidad, esta fulguración presentó la peculiaridad de una débil emisión de rayos gamma frente a otro caso (el ocurrido el 7 de junio de ese mismo año), en el que una fulguración de la mitad de tamaño (en Hα) ofrecía una emisión de rayos gamma unas diez veces mayor. La correlación que se suponía entre el tamaño de la fulguración y la aceleración de núcleos atómicos con emisión de rayos γ quedó puesta en entredicho.

Las sorpresas no acabaron ahí. La fulguración registrada el 7 de abril de 1980 no despejaba las dudas sobre el material acelerado por la fulguración. Se vio entonces que el material expulsado tenía una energía cinética unas 10 veces superior a la emitida en ondas electromagnéticas, mientras que en otros casos de fulguraciones observadas en el limbo solar no se observaba perturbación alguna en la corona. La aparición de nuevos interrogantes es un indicio de que el proceso de conocimiento de las fulguraciones aunque largo se encuentra vivo y cuenta con el esfuerzo y cooperación de centenares de científicos de todo el mundo.

Ciencia y sociedad

Nobel de física 1982

Con el premio Nobel de física de 1982 se reconoce el mérito de K. G. Wilson en la culminación de un largo proceso histórico cuyo inicio cabe situar en 1681, con la invención de la olla exprés por el científico francés D. Papin (1647-1712): un líquido sometido a presión superior a la normal hierve a temperatura superior a la normal, y, de ahí, una cocción de los alimentos más rápida. La temperatura de ebullición depende, pues, de la presión; más aún, por encima de cierta presión y temperatura, cuyos valores dependen de cada líquido, la ebullición se hace imposible, así como la licuefacción del gas, y no cabe distinguir entre líquido y vapor. Ambas, presión y temperatura, definen lo que llamamos el punto crítico (final de la curva de presión de vapor) del fluido en cuestión, descubierto por el francés Cagniard de la Tour (1777-1859) y el británico T. Andrews (1813-1885). Fenómenos análogos se descubrieron posteriormente en las propiedades magnéticas de la materia, en los imanes. Todo imán se puede desimantar sin más que calentarlo convenientemente. El punto crítico en el que un imán se desimanta al calentarlo (o, por el contrario, al enfriarlo se imanta espontáneamente), es la temperatura de Curie, en honor de su descubridor P. Curie (1859-1906). Por otro lado, puntos críticos son todos los puntos, definidos por la presión y temperatura adecuadas, en que el helio (isótopo 4 o 3) pasa de líquido ordinario a superfluido. He aquí algunos hechos científicos y de la vida corriente que han exigido casi un siglo para su satisfactoria y completa explicación con las teorías que culminan en Wilson.

El primer científico que abrió brecha en el estudio de las transiciones de fase, y en particular de líquido a gas y de su punto crítico (no hay punto crítico entre un sólido y su líquido), fue el holandés J. D. van der Waals (1837-1923). Después le siguieron J. W. Gibbs (1839-1903), J. C. Maxwell (1831-1879) y A. Einstein (1879-1955) entre otros. Físicos que, junto con L. Boltzmann (1844-1906), constituyen el grupo selecto de padres fundadores de la mecánica estadística, la más completa y universal disciplina de la física teórica. Tras P. Weiss (1906) y E. A. Guggenheim (1945), y todos los que entre medio fueron aportando ideas, cálculos y experimentos, el gran salto adelante vino en 1937, con el ruso L. D. Landau (1908-1968) y, en 1944, con el noruego-americano L. Onsager (1903-1976), quienes de manera independiente y por derroteros diferentes pusieron los dos pilares básicos y complementarios sobre los que no sólo se apoyó Wilson, sino todo un extraordinario y fértil desarrollo de la mecánica estadística de las transiciones de fase o transiciones entre los diferentes estados de la materia (fluidos, sólidos, gases, imanes, ferroeléctricos, superfluidos, superconductores, plasmas, cristales líquidos, etcétera). Onsager hizo un cálculo exacto con un modelo sencillo de imán y Landau desarrolló una teoría aproximada, general y heurística, de las posibles transiciones entre cualesquiera imanes. La generalización de estos resultados a otros sistemas materiales y, por analogía, a otros dominios de la ciencia (química, biología, economía y sociología) es hoy objeto de intenso estudio y progreso.

La teoría de Wilson trata de una clase muy importante de problemas entre aquellos que involucran numerosísimos (infinitos) elementos o grados de libertad en interacción. Se refiere a sistemas en los que en determinadas circunstancias (tales como un cambio de fase o estado) la suma de las acciones de las partes puede dar, y da, algo mayor que el esperado total: por eso se dice que son sistemas sinergéticos, y se habla de procesos o fenómenos cooperativos o colectivos. Si un imán se parte en pedacitos, cualquiera de ellos es un imán como el original. Intentar desimantar una sección de un imán es empresa imposi-

SWEDISH ROYAL ACADEMY OF SCIENCES
NOBEL COMMITTEE FOR PHYSICS

STRICTLY CONFIDENTIAL



Professor M.G. Velarde
Madrid

On behalf of the Swedish Royal Academy of Sciences we, as members of the Nobel Committee for Physics, have the honour of inviting you to submit proposals for the award of

The Nobel prize for Physics for 1980.

According to the Rules of the Nobel Foundation the discovery or invention should be indicated for which the award is proposed and full reasons given for the suggestion. Work done in the past may be selected for the award only on the supposition that its significance has until recently not been fully appreciated.

The person nominating a candidate is requested, neither to make known his nomination, nor to inform his nominee of the nomination.

A summary of the regulations governing awards is appended as well as a form which may be used for the proposal of candidate(s).

Proposals, which should be addressed to The Nobel Committee for Physics, Sturegatan 14, S-114 36 Stockholm, Sweden, cannot be considered unless received by the Committee not later than 31 January 1980.

Stockholm, September 1979,

LAMEK HULTHÉN
CHAIRMAN

GÖSTA EKSPONG

SVEN JOHANSSON

STIG LUNDQVIST

BENGT NAGEL
SECRETARY

PER OLOV LÖWDIN

Invitación cursada por el Comité de Física de la Fundación Nobel al profesor

ble sin desimantarlo por entero. No ocurre así con un trozo de hielo, que funde poco a poco. Por eso Landau distinguió entre transiciones cooperativas (la del imán) y no cooperativas (la del hielo).

En las transiciones cooperativas, en los puntos críticos, el sistema responde con una susceptibilidad, una respuesta, anormalmente exagerada. Es decir, para perturbaciones externas, aparentemente pequeñas, la respuesta no es lo que cabría esperar, es decir, lo que ocurre fuera de las regiones de transición. ¿No decimos que una persona se muestra "susceptible" y parece "inestable", o que su situación es "crítica", cuando para pequeñas variaciones o perturbaciones de su entorno (la broma de un viejo amigo mal tomada, el cambio de sus constantes vitales en un enfermo en la unidad de vigilancia intensiva) responde de forma violenta (agresivamente al amigo o va de la vida a la muerte)? En los sistemas de infinitos elementos interrelacionados hay siempre muchísimas escalas o longitudes en juego; por ejemplo: escalas de tiempo y de energía. La relevancia o predominio de alguna o de unas pocas de ellas se hace patente en las regiones de transición e inestabilidad previas a un cambio o tentativa de cambio de fase. ¿A partir de qué valores de longitud, de ámbito o esfera de influencia el papel de una escala es dominante sobre las inferiores y afecta al sistema entero? ¿Cómo describir lo que va ocurriéndole al sistema conforme nos acercamos más y más al punto de transición? En la teoría de las transiciones cooperativas en física algunas de las anteriores preguntas y cuestiones han encontrado respuesta. Contemporáneos de Wilson abrieron su camino. Fueron L. P. Kadanoff, M. E. Fisher, B. Widom, C. Domb y R. B. Griffiths, entre otros. Mas, para el experto, no hay duda del toque genial de Wilson, capaz de ver donde tan ilustres colegas no habían visto.

NOMINATION FOR THE AWARD OF THE 1980 NOBEL PRIZE FOR PHYSICS

Candidate(s):

Name WILSON , Kenneth G. Position or title Professor of Physics

Address (Institution) Cornell University, Ithaca, N.Y. (USA)

Name KADANOFF, Leo P. Position or title Professor of Physics

Address (Institution) Brown University, Providence , R.I. (USA)

Name DE GENNES, Pierre Gilles Position or title Professor of Physics

Address (Institution) Collège de France, Paris (France)

The nomination concerns the discovery (invention) of

i. Wilson and Kadanoff: methods to deal with success with cooperative phenomena in phase transitions and other areas of physics(field theory, elementary particles,etc.)that led to solution of problems(Kondo effect,etc)long time oustanding and also led to a deeper understanding

Brief motivation. (Detailed motivation, bibliography, curriculum vitae and other relevant documents may be appended.)

of cooperative phenomena in physics and nonphysics problems.

ii.de Gennes: his oustanding contributions to the fields of liquid crystals and polymer physics, not to mention earlier work in other areas of physics. Some of his work on polymers have been done using the renormalization group approach developped by K.G. Wilson.

Please note that Wilson's achievements rely very heavily upon the pioneering and fertile ideas of L.P. Kadanoff.

With the work of Kadanoff and Wilson one can say that a chapter of Physics has been closed down: equilibrium critical(cooperative)phenomena However, new perspectives have appeared in the field of non-equilibri cooperative phenomena and other areas of physics , as mentionned above.

With the work of de Gennes on lyquid crystals a real breakthrough was achieved.

Nominator VELARDE, Manuel G. Position or title Professor of Physics

Address (Institution) Universidad Autónoma de Madrid (Cantoblanco) Madrid-SPAIN

Signature of nominator M. G. Velarde. Date January 8, 1980

García Velarde para proponer candidatos en 1980. A la derecha, la respuesta.

En las zonas de transición, o regiones críticas, numerosas fluctuaciones macroscópicas intentan aflorar y llegar a establecerse, aprovechándose de lo revuelto o inestable de la zona de transición. Se dice que una fluctuación domina cuando, tras la transición, se establece como controladora de la nueva fase, estado o etapa. Landau creó la teoría de cómo evolucionan esos modos o fluctuaciones dominantes, que llamó parámetros de ordenamiento del sistema. Sin embargo, su teoría se limitó al estudio de valores medios de dichas magnitudes. La teoría de Wilson permite entender por qué es preciso ir más allá de la teoría de Landau en el estudio de las transiciones de fase cooperativas [véase "Problemas físicos con muchas escalas de longitud", por K. Wilson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre, 1979].

En todo colectivo, sede de transiciones cooperativas, cabe delinear dos aspectos de la respuesta frente a las perturbaciones externas: de un lado, la respuesta individual o susceptibilidad –en media– por elemento; por otro, la acción media (o campo medio) del sistema sobre el individuo y que caracteriza el acoplamiento de la respuesta individual (por átomo, espín, etcétera) con la de los demás. En condiciones normales y, sobre todo, en momentos de transición, parece razonable aceptar que la eficacia de la relación individuo-colectivo venga medida por el producto de ambas magnitudes. ¿Cómo calcular su evolución y su valor?

Ha sido, pues, Wilson quien desde 1971 (con trabajos y conferencias que, al principio, hubo que calificar de "oscuros") quien ha proporcionado un potente y completo esquema de ataque y solución definitiva (?) de los problemas que hemos ido mencionando y que, como dijimos al principio, empezaron a estudiarse desde que se inventó la olla exprés, lo que tan ajeno estaba, a primera vista, del comportamiento de un conjunto de átomos en un imán. Invitado por el Comité de Física de la Fundación Nobel a proponer candidatos para el de 1980 tuve el placer de proponer a Kenneth G. Wilson al premio que dos años más tarde le ha sido, merecidamente, concedido. (M. G. Velarde.)

Klug, Nobel de química 1982

Aaron Klug nace, en 1926, en Johannesburgo, Africa del Sur. Cursó sus estudios superiores en Inglaterra, donde se doctoró en 1951 por la Uni-

versidad de Cambridge. Klug posee una formación eminentemente químico-física y su especialidad es la de las grandes técnicas físicas: cristalografía, difracción de rayos X y microscopía electrónica, que ha aplicado y adaptado al estudio de problemas esencialmente biológicos. No es aventurado pensar que su trayectoria científica resultase sensiblemente influida por el alto nivel del entorno marcadamente físico teórico que dominaba los centros de investigación ingleses de la época, con sus focos principales de Londres y Cambridge. La brillantez científica y fecundidad de esta época no fueron producto del azar, sino la consecuencia directa de una apropiada política científica desarrollada por las instituciones inglesas y de la consiguiente acción de soporte. Estos elementos favorecieron la constitución de grupos de trabajo selectos y la integración en ellos de científicos con descollante personalidad, entre los que se cuenta el propio Klug. No es exagerado señalar que el nivel científico alcanzado, consecuencia inmediata del mencionado ambiente, se haya convertido en el fundamento del estado actual del conocimiento biológico. Los resultados cosechados son de todos conocidos: en esta época se elucidó el problema de la estructura del ADN y se resolvieron las estructuras cristalinas de las primeras proteínas. Asimismo, se desveló el enigma de la organización estructural de los virus y se abordó el estudio del movimiento muscular. Klug fue un testigo de excepción de estos estudios en los que participó y contribuyó personalmente.

Estuvo estrechamente vinculado con la doctora Rosalind Franklin, una de las figuras más controvertidas que intervinieron en el descubrimiento del "mecanismo básico por el cual la vida se hace proceder de la vida" [carta del profesor Francis Crick a su hijo, fechada el 19 de noviembre de 1953]: la estructura del material genético. Su asociación, en calidad de colaborador postdoctoral, se inició en 1951 cuando ambos se incorporaron al King's College de la Universidad de Londres con el objeto de adaptar el análisis de difracción de rayos X al estudio de materiales biológicos, en particular de ácidos nucleicos. Klug intervino, pues, en la obtención de los diagramas de difracción que permitieron descifrar la configuración del ADN. Tres años más tarde, en 1953, se trasladó juntamente con Franklin al laboratorio de cristalografía del Birkbeck College de la Universidad de Londres, dirigido por J. D. Bernal. En 1962 pasó al laboratorio de biología molecular del Medical Research Council, de Cambridge, donde dirige hoy la unidad para el estudio de estructuras moleculares de sistemas biológicos.

Durante los últimos años Klug se ha dedicado intensamente al estudio del ordenamiento y organización de la estructura de los cromosomas, que ha conducido a la definición de los principios que soportan la flexibilidad estructural de los genes. En 1971 inició con Francis Crick el análisis teórico exhaustivo de las alternativas al modelo del plegamiento superhelicoidal del ADN propuesto por Wilkins. Esta exploración teórica, respaldada por experimentos de difracción por rayos X de complejos reconstituidos de ADN e histonas, condujo a la proposición del modelo del nucleosoma o subunidad elemental de la estructura de los cromosomas.

Sabedor de que la descripción estructural completa de un material exige información tridimensional que sólo puede recabarse del análisis cristalográfico, el doctor Klug acometió la adaptación de esta poderosa técnica analítica al estudio del material genético, desarrollando procedimientos que permitieran la cristalización del nucleosoma. Dado que la deducción de una estructura tridimensional a partir de macromoléculas cristalizadas es un proceso extraordinariamente laborioso, Klug tuvo la intuición de combinar la difracción de rayos X con la microscopía electrónica diseñando un ingenioso método que permitiera la elaboración y reconstrucción tridimensional de imágenes. La información procedente de los rayos X y de la microscopía electrónica se combina para producir mapas detallados de contorno de las densidades electrónicas en los cristales. Mediante la reconstrucción tridimensional se obtienen representaciones con tres enfoques específicos o proyecciones de las densidades a lo largo de los tres ejes principales de las macromoléculas cristalinas. El resultado es la reproducción por imagen de sus características específicas.

Para incrementar al máximo el poder de resolución de los mapas de densidad, Klug ha introducido el sistema de la substitución isomorfa que permite distinguir entre las diferentes densidades de los componentes del nucleosoma: el ADN y las histonas [véase "El nucleosoma", por Roger D. Kornberg y Aaron Klug; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1981]. Esta metodología recurre a la difracción por neutrones a baja resolución por variación de contraste, igualando alternativamente la densidad debida a los componentes individualizados del nucleosoma con la del disolvente. De esta forma se consigue detectar la dispersión provocada exclusivamente por un elemento.

Este refinamiento metodológico progresivo ha permitido, por primera vez, hacerse una imagen de cómo los genes se ordenan en el cromosoma y de cómo sus estructuras cambian y se adaptan para dar lugar a la expresión selectiva de la información genética. Con toda certeza, esta última contribución es la más significativa de las realizadas por Klug en pro del desarrollo científico.

La dilatada labor desplegada por él acerca de la adecuación, primero, de estas poderosas técnicas de análisis físico al estudio de materiales biológicos y, posteriormente, su refinamiento hasta límites extremos de resolución, le ha hecho acreedor al Nobel. Estas contribuciones no hubieran sido posibles sin el concurso de unas instituciones de brillante y extenso historial y sin sustentarse en equipos de científicos de una calidad excepcional. Es indudable que la distinción otorgada a Klug conlleva el reconocimiento implícito de esta circunstancia y, en cierto modo, consolida los elementos decisivos que impulsan el avance del conocimiento científico. (L. Cornudella.)

En cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 24 de la vigente Ley de Prensa e Imprenta, se hace constar, a continuación, los datos en él requeridos.

Accionistas de Prensa Científica, S. A.:
Editorial Labor, S. A.
Scientific American, Inc.

Consejo de Administración:
Presidente:
José M.ª Naharro Mora
Vicepresidente:
George S. Conn
Consejero-Delegado:
D. Francisco Gracia Guillén
Vocales:
D. Juan Miró Chavarría
D. Gerard Piel
D. Dennis Flanagan
Secretario:
D. Agustín Mária Rabarté

Situación financiera al 31 de diciembre de 1981, según se deduce del balance aprobado por la Junta General ordinaria de Accionistas celebrada el día 20 de mayo de 1982.

ACTIVO	
Tesorería	82.753.108,—
Existencias	20.216.134,—
Inmovilizado	757.742,—
Resultados	5.285.364,—
	109.012.348,—

PASIVO	
Capital	31.000.000,—
Cuentas acredoras	78.012.348,—
	109.012.348,—

Inteligencia artificial

Además de los programas de juego existen otros capaces de procesar información visual, aprender de la experiencia y comprender el lenguaje natural. La tarea más difícil será simular el sentido común

David L. Waltz

Desde el momento mismo de la invención de las computadoras, se ha venido insistiendo reiteradamente en la idea de que llegará el día en que los ordenadores electrónicos digitales alcancen o superen las dotes intelectuales de los humanos. En los primeros días, recién nacidas las ciencias de cómputo, semejante afirmación carecía de fundamento empírico. No podía esperarse entonces que los programas razonasen, hiciesen planes, aprendiesen, formulasen conceptos, se valiesen del lenguaje humano o pensasen creativamente mejor de lo que pudiesen hacerlo sus predecesores mecánicos en el arte de la simulación: marionetas, muñecos de cuerda o cajitas de música. Además, la idea misma de que la inteligencia pudiese requerir un marco referencial teórico para ser explicada no era por entonces admitida sino por unos pocos. Se consideraba que la inteligencia era una noción transparente, y si hubiera de serle reconocida a una máquina, las potencias intelectuales de ésta tendrían que ser casi indistinguibles de las correspondientes potencias de los humanos. Por eso, los primeros ordenadores fueron llamados "cerebros electrónicos"; John von Neumann, uno de los arquitectos del tipo de ordenador más utilizado en nuestros días, formuló explícitamente analogías entre ordenador y cerebro humano. Aún hoy, muchas personas asimilan datos con conocimientos, la ejecución de un programa con la adopción y puesta en práctica de decisiones, la traza, o sea, el progresivo registro de los resultados elaborados por el programa, con la corriente de la consciencia, y la adquisición de datos, con el acto de aprender.

En los 20 o 25 últimos años, una nueva disciplina, la inteligencia artificial, ha dado eterno descanso a algunas de las más ingenuas analogías entre ordenador y cerebro y ha emprendido la tarea de proveer de cimentación teórica al concepto de inteligencia. Para los profesionales de la disciplina, el ordenador es como un laboratorio donde desarrollar nuevas formas de pensar acerca del pensar. Programas redactados por investigadores en inteligencia artificial han demostrado, concluyentemente, que en ciertas actividades (entre ellas algunas para las que casi todo el mundo concedería que se precisa inteligencia, como en los juegos de tablero) el ordenador puede aventajar al ser humano. Programas recientes han puesto de manifiesto que el ordenador puede incluso desarrollar teorías muy elaboradas a partir de unos cuantos axiomas sencillos en dominios restringidos, como el aritmético. Al mismo tiempo, la comprensión de ciertas características de la inteligencia humana se ha visto considerablemente enriquecida al intentar la descripción de rasgos análogos con el detalle necesario como para escribir un programa. Y en consecuencia, el paralelismo entre mente y ordenador se ha ensanchado y madurado.

Fijémonos en el acto de aprender. En las personas, el aprendizaje parece estar íntimamente ligado al crecimiento y cambio de la estructura física del cerebro; el *hardware*, el dispositivo mecánico-eléctrico del ordenador, no experimenta en absoluto cambios análogos. Empero, los programas de un ordenador pueden cambiar de multitud de otras formas: pueden acumular datos, organizarlos e incluso modificarlos o modificarse a sí mismos. Por este motivo, quienes trabajan en inteligencia artificial han sugerido que ciertos programas complejos, y particularmente los capaces de modificar sus propias operaciones, pudieran ser modelos idóneos del aprender humano. Al igual que los demás modelos empleados en la investigación científica, éstos no reproducen en todo su detalle el fenómeno que se proponen representar. Por ejemplo, las operaciones de un ordenador que incorpore en sí un programa "capaz de aprender" no guardan relación explicativa alguna con el aprendizaje de los humanos, en tanto que éste se concreta en pautas de excitación de grupos de células nerviosas y cerebrales. Mas el modelo computerizado de inteligencia sí es lo bastante flexible como para ser formulado con tanto detalle como se considere adecuado para arrojar luz sobre las funciones esenciales del pensamiento humano.

Intentaré aquí dar una idea de los tipos de resultados que pueden alcanzarse mediante programas de inteligencia artificial. Casi todos los programas que me dispongo a comentar corresponden a enfoques bien conocidos de los problemas principales de este campo, y mis descripciones se proponen, sobre todo, dejar a la vista cuáles han sido las principales aportaciones de cada programa. He tendido por ello a preferir programas cuyo funcionamiento pudiera ser explicado brevemente. Cuanto sigue debe leerse más como una introducción a este campo que como sumario de lo que se está haciendo en él.

En inteligencia artificial, la cuestión de cómo explorar de forma óptima una gama de acciones posibles, al perseguir objetivos bien definidos, es tema que se presenta constantemente. En general, cada acción adoptada abre varias continuaciones, nuevas y posibles; por ello, al planear una sucesión de acciones es forzoso tener presente una estructura ramificada de posibles estados, llamada árbol de búsqueda o árbol de exploración. Por lo común, este árbol se presenta invertido, con la raíz hacia lo alto. La raíz representa la situación actual; las ramas son las acciones posibles y, los extremos de las ramas, los posibles resultados, de los cuales uno o varios pueden corresponder al objetivo de la búsqueda.

Exploración heurística

Explorar la gama completa de todas las acciones posibles, en todos los órdenes secuencialmente posibles, equival-

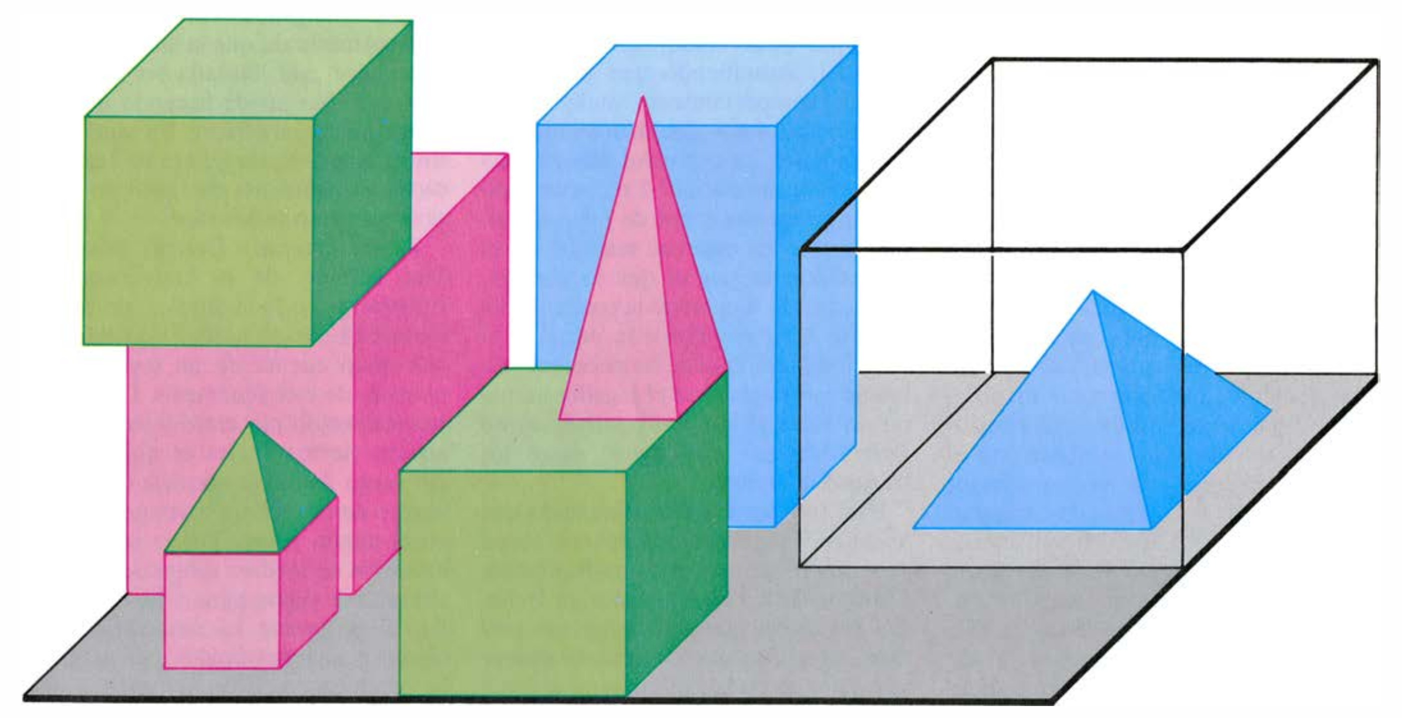
dría a repasar todas las ramas del árbol; ello garantizaría, sin duda, el reconocimiento de la sucesión óptima. Sin embargo, en muchos casos, el árbol de exploración es tan grande que la búsqueda exhaustiva no es factible. Por esta razón, casi todos los programas de inteligencia artificial llevan incorporados principios heurísticos, reglas prácticas informales "de la mano derecha", de suerte que las acciones más prometedoras sean objeto de análisis especial, mientras las menos interesantes son eliminadas sin dedicarles plena atención. Aunque los principios heurísticos son prácticos y eficaces en casi todas las circunstancias, abreviando mucho la exploración, al aplicarlos se pierde la certeza de hallar el resultado óptimo. Ordinariamente, los programas que permiten a un robot planear la manipulación de objetos o sus propios movimientos en el espacio se valen de métodos de exploración heurística.

Entre los programas que aplican métodos de búsqueda orientada heurísticamente tenemos los programas para juegos de salón, como ajedrez, damas o chaquete (*backgammon*). En nuestros días, muchos de estos programas alcanzan niveles de jugador experto o maestro. Un programa bautizado Mighty Bee (Abejita poderosa), escrito por Hans Berliner, de la Universidad Carnegie-Mellon, derrotó en 1979 al campeón mundial de chaquete. Donde se haya concentrado un mayor interés sea seguramente en los programas ajedrecísticos; virtualmente todos los que han sido ideados desde el decenio de 1950 están fundados en un modelo de búsqueda heurística puesto a punto por Claude E. Shannon, de los laboratorios Bell.

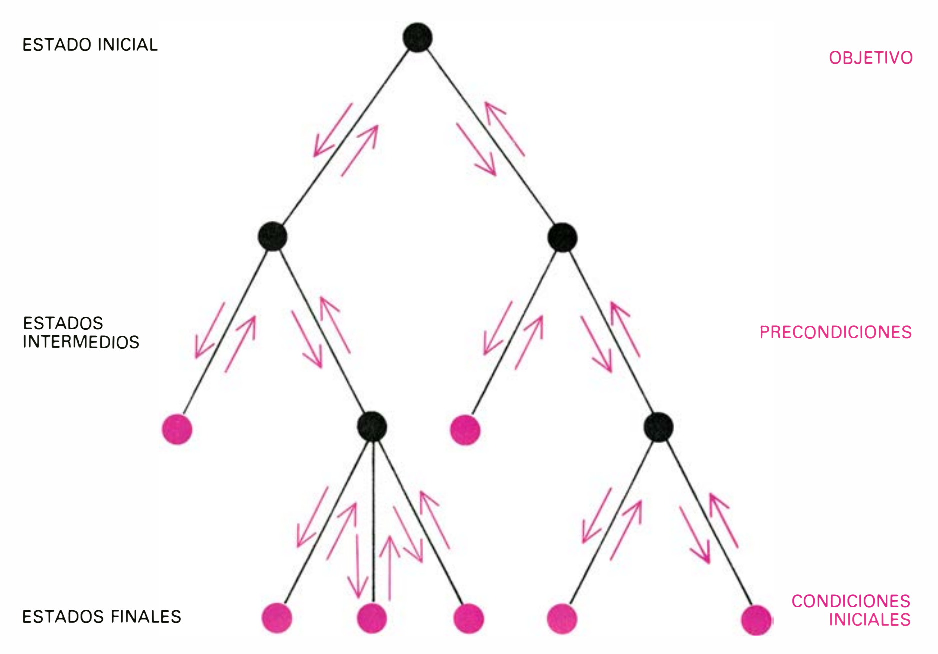
Cuando un programa ajedrecístico está en el proceso de decidir cuál será su siguiente jugada tiene que ir evaluando de alguna forma la situación resultante de cada jugada potencial. Tal evaluación puede hacerse mediante un sistema de puntuación, basado, por ejemplo, en asignar valores a las piezas y en la gravedad de la amenaza a cada pieza que pueda ser capturada en la siguiente jugada [*véase la ilustración de la página 51*]. Muchos programas toman en cuenta también el valor posicional de los peones, el grado de control sobre el centro del tablero y el número de piezas puestas en juego. El programa selecciona su juego buscando hacer máxima la puntuación.

Los principios heurísticos incorporados al programa ajedrecístico regulan la amplitud y la profundidad del árbol que el programa va explorando en su búsqueda de la jugada óptima. En términos generales, el programa calcula la puntuación correspondiente a cada jugada lícita que parte de una situación dada. Seguidamente puede examinar las respuestas del contrario a cada una de estas jugadas y la gama de contraataques propios para cada una de estas respuestas. No obstante, ya al principio del proceso será necesaria una primera selección de jugadas; de lo contrario, el número de posiciones a examinar llega enseguida a hacerse desmesurado. En este proceso de selección intervienen precisamente los principios heurísticos. Así, el programa podría seleccionar para estudio ulterior tan sólo la jugada de máxima puntuación, o podría explorar las consecuencias de las cinco jugadas más prometedoras, pongamos por caso. Para las jugadas todavía pendientes de consideración, el programa examina el árbol de exploración hasta cierta profundidad especificada, momento en el cual los principios heurísticos determinarán si la exploración debe o no continuar: una línea de exploración es abandonada sólo si la situación a que conduce es razonablemente estable. Las negras hacen entonces la jugada que más verosímilmente vaya a darles máxima puntuación, suponiendo que las blancas efectúan en cada turno la mejor de las jugadas admisibles.

En ajedrez, el número medio de jugadas lícitas que parten de una situa-



"EL MUNDO DE BLOQUES" es un dominio sumamente simplificado que sirve a los investigadores en inteligencia artificial para explorar de qué forma puede un ordenador simular y encadenar percepción, pensamiento y acción. El mundo de bloques del ordenador está representado por los cubos, cajas y pirámides de colores de la ilustración. También forman parte del mundo de bloques los principios ordinarios de interacción física. En el mundo de bloques no está permitido, por ejemplo, dejar en equilibrio una pirámide sobre su vértice. El mundo de bloques fue ideado, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, por Terry A. Winograd (hoy en la Universidad de Stanford), para servir como campo de actuación de un programa de ordenador llamado SHRDLU. El programa SHRDLU simula las acciones y respuestas de una persona con respecto a los objetos del mundo: puede planear y ejecutar ciertas manipulaciones de los objetos obedeciendo instrucciones dadas al ordenador en lenguaje natural ordinario, puede contestar preguntas acerca de configuraciones presentes y pasadas de ese mundo, acerca de acciones que ha ejecutado ya o que planea efectuar y acerca de las razones que le asisten para efectuarlas. Otros investigadores han mostrado cómo construir modelos del aprendizaje de nuevas acciones en el mundo de los bloques. Las escenas del mundo de bloques aquí reproducidas han sido adaptadas del artículo de Winograd "Understanding Natural Language", en *Cognitive Psychology*.



EXPLORACION SISTEMATICA de una estructura arbórea invertida. Se va efectuando desde el nudo superior —la raíz—, a lo largo de la rama izquierda, hasta un nudo terminal. La exploración retorna entonces al primer nudo intermedio, a partir del cual puede bajar por otra rama, prosiguiendo la exploración hasta que se hayan examinado todos los nudos terminales, de izquierda a derecha (*flechas de color*). Los árboles invertidos permiten representar la estructura de gran variedad de problemas. La raíz puede representar una situación dada, como, por ejemplo, una posición de una partida de ajedrez, y cada nudo situado directamente debajo de la raíz denota el resultado de alguna acción posible desde aquella situación, así el movimiento de alguna pieza. Los nudos aún más bajos pueden simbolizar los resultados de acciones subsiguientes, por ejemplo, las respuestas del jugador contrario a nuestros movimientos. La raíz del árbol puede representar un objetivo, y los nudos de ramificación intermedios constituir entonces condiciones previas para efectuar acciones que logren el objetivo. Cada una de las condiciones previas puede tener a su vez pre-condiciones propias, representadas por nudos del nivel siguiente. La exploración de una estructura arbórea es un procedimiento serial: los nudos se examinan uno tras otro.

ción dada es de 35; una búsqueda exhaustiva de sólo tres niveles de profundidad para cada jugador obligaría a examinar más de 1800 millones de jugadas. Se han ideado procedimientos rigurosos para podar el árbol; mas, a pesar de tales métodos, el funcionamiento de casi todos los programas consiste básicamente en explorar por extenso el árbol de búsqueda. Entre los programas ajedrecísticos actuales el campeón es Belle, preparado por Ken Thompson y Joe Condon, de los laboratorios Bell. Este programa funciona sobre un ordenador especializado, cuya red electrónica interna ha sido diseñada con el propósito expreso de efectuar cálculos ajedrecísticos, y es capaz de examinar en promedio unas 160.000 situaciones por segundo. Cuando Belle participa en torneos, lo hace con una clasificación de 2160 (las clasificaciones de 2000 a 2199 dan al jugador categoría de experto); su nivel de juego es, pues, superior al de los humanos, exceptuando de éstos una minúscula fracción.

Relación entre inteligencia artificial y psicología

El funcionamiento de Belle y de otros programas ajedrecísticos similares pone de relieve una de las cuestiones más importantes que conciernen a los objetivos del trabajo en inteligencia artificial. Admitiendo que la simulación del comportamiento inteligente de los humanos fuese uno de los objetivos primordiales, ¿a qué nivel deberá efectuarse esta simulación? En cierto sentido, un programa capaz de jugar al ajedrez a nivel de experto, sea cual sea el procedimiento por el que lo consiga, está sin duda simulando la conducta del experto humano. Por otra parte, si el objetivo fuese emular las decisiones de índole estratégica que el jugador humano va tomando, los programas como Belle deberían catalogarse entre los fracasos completos.

Está suficientemente constatado que los buenos jugadores humanos se valen de métodos de procesado radicalmente distintos de los incorporados en Belle. Los jugadores humanos basan sus partidas en estrategias: se marcan objetivos, tales como la captura de una pieza determinada, y buscan después vías para alcanzarlos. A tal fin puede ser necesario establecer una serie de objetivos secundarios y verificar que cada uno de ellos esté a su alcance. Se ha demostrado mediante ensayos que un buen jugador no examina arriba de 100 posiciones antes de optar por una jugada. Tan sólo se toman en cuenta las líneas de ataque más prometedoras; a cambio, éstas son exploradas hasta profundidades relativamente grandes. Por el contrario, Belle examina alrededor de 29 millones de situaciones en el tiempo de tres minutos que por término medio puede dedicarse a cada jugada en una partida de torneo.

En vista del éxito de Belle frente al tablero escaqueado, parece claro que pueden lograrse conductas inteligentes a partir de procesos intrínsecamente muy distintos de la congnición humana. Algunos investigadores aducen, empero, que la inteligencia artificial es, hablando en general, una rama de la psicología humana. Su tesis es que siempre que un programa simule algún aspecto de la capacidad intelectual humana, el programa constituye una "demostración de existencia" de modelos computarizados de inteligencia humana. En su funcionamiento, el programa puede alejarse tanto de los procesos mentales humanos que resulte imposible extraer de él consecuencias válidas en psicología humana. No obstante, el programa puede simular otros aspectos de la inteligencia humana que parecen tener suma importancia, tales como la impredictibilidad de su rendimiento. Es cosa corriente que los programas ajedrecísticos jueguen mejor que las personas que los escribieron, y por ello resulta muy engañoso afirmar, como tantos acostumbran, que la inteligencia del ordenador está limitada porque el ordenador sólo puede hacer lo que está programado para hacer. En muchos casos el programador ignora de cuánto es capaz su programa en tanto no lo ensaya sobre un ordenador.

Recientemente, Donald Michie y Tim Niblett, de la Universidad de Edimburgo, e Ivan Bratko, de la Universidad Edward Kardelj de Ljubljana, han dado cuenta de un sorprendente ejemplo de este fenómeno. Un programa preparado por estos investigadores analiza ciertos finales de ajedrez, fase del juego donde la mayoría de programas se desenvuelven bastante peor que en el medio juego. Por lo común, los maestros de ajedrez saben de memoria sistemas de reglas para el final de partida; el programa ha demostrado que ciertas posiciones finales que se pensaba conducían a tablas permiten en realidad a uno de los bandos imponer una victoria. Mas, para conseguirla, uno de ellos ha de atenerse a un sistema de reglas demasiado complicado para poder ser fácilmente recordadas por un jugador humano; reglas, por otra parte, para las que los ordenadores actuales tienen sobrada capacidad.

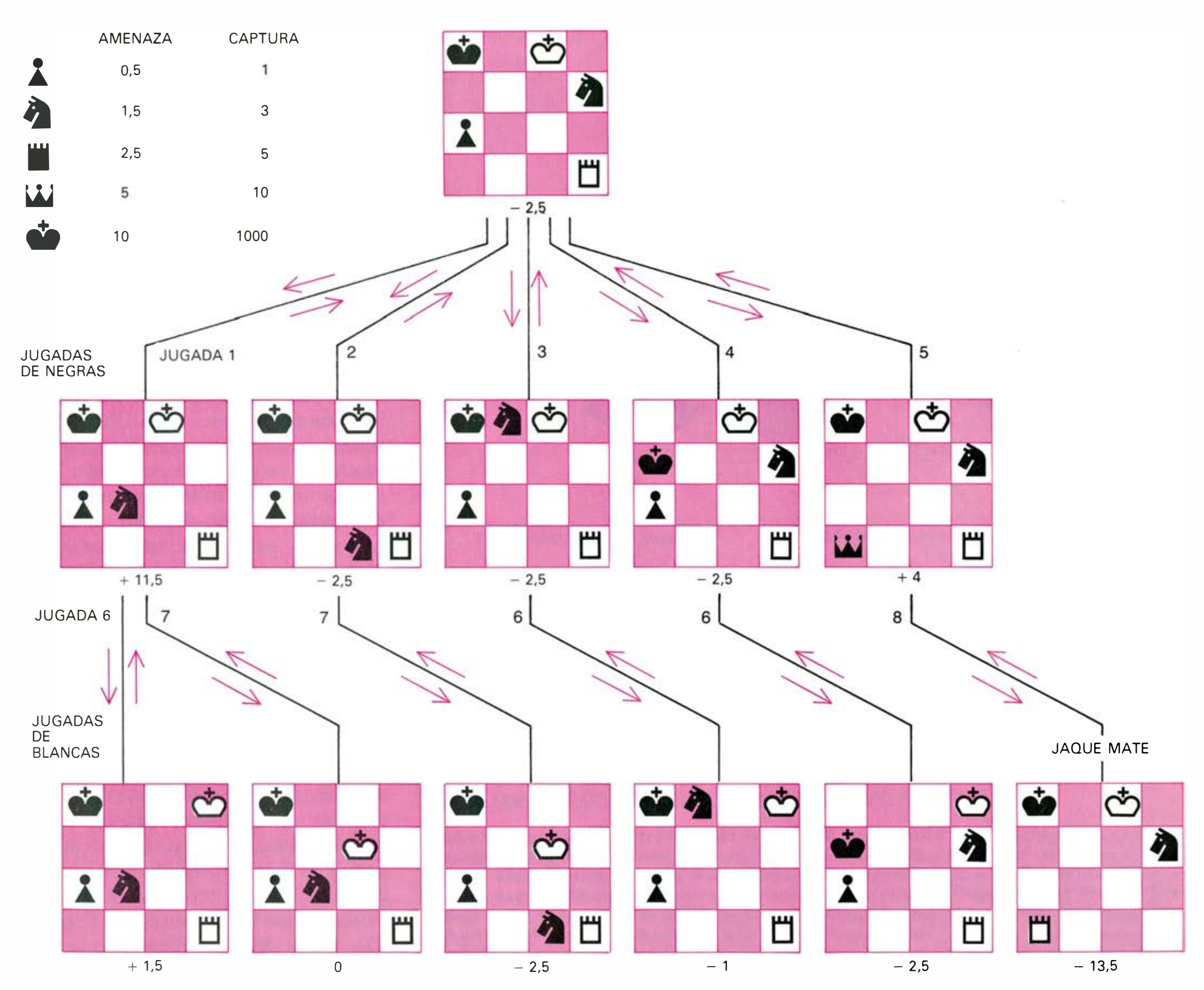
Si bien los programas ajedrecísticos

no poseen entre sus rasgos dominantes la planificación orientada a objetivos, en teoría es sencillo escribir un programa que reconozca e identifique objetivos y descubra caminos conducentes a ellos. Como antes, el funcionamiento del programa puede ser comprendido como exploración de una estructura arborescente invertida.

Planificación

La raíz del árbol representa el objetivo; los nudos a él conectados por ramas representan requisitos previos, a satisfacer antes de poder alcanzar el objetivo. (Los prerrequisitos que tomados conjuntamente bastarían para alcanzar la meta están interconectados; de todas formas, en el árbol están representados todos los conjuntos de prerrequisitos suficientes.) Cada condición previa puede a su vez convertirse en un objetivo secundario, con sus propias condiciones previas, representadas por otras series de nudos de ramificación. Los nodos terminales del árbol representan condiciones satisfechas ya por el estado de cosas inicial. Con cada nudo no terminal está asociada una acción capaz de alcanzar una meta principal o secundaria. El programa explora todas las ramas del árbol, hasta que todas las condiciones previas quedan satisfechas. Seguidamente construye un plan de actuación, trazando un sendero que a través del árbol enlace el nudo más bajo con el más alto.

Un programa preparado a fines de los años sesenta y primeros setenta por Terry A. Winograd (a la sazón en el Instituto de Tecnología de Massachusetts) permite ilustrar en un dominio cuidadosamente acotado el funcionamiento de uno de estos programas de planificación. El programa de Winograd se llama SHRDLU, por ser éstas las letras que por orden de máxima utilización ocupan en inglés los lugares séptimo a duodécimo; el dominio donde opera está compuesto por objetos tridimensionales sencillos, tales como cubos y pirámides, en reposo sobre una mesa. (En realidad, el programa no tiene dispositivos para manipular objetos materiales, ni siquiera para representarlos sobre una pantalla de vídeo, pero sí lle-



ESTRUCTURA ARBOREA de una partida de ajedrez simplificada. Evidencia que el programa, que aquí juega con negras, procede a determinar cuál será su jugada siguiente. El programa va examinando una por una las jugadas factibles y las respuestas del contrario, recorriendo el árbol de juego (*flechas rojas*) hasta una profundidad determinada por reglas heurísticas. A cada posición del juego se le asigna una puntuación conforme a un cierto sistema de evaluación; por ejemplo, el que vemos en la tabla superior izquierda. La posición inicial, que aquí se halla en lo alto del árbol, tiene puntuación −2,5: un total de 1004 para las piezas negras del tablero, −1005 para las blancas, y −1,5 por la amenaza al caballo negro. La jugada seleccionada será la que produzca mayor puntuación para las negras a la profundidad máxima examinada, suponiendo que las blancas se decidan siempre por la mejor de sus jugadas factibles. En este caso, las negras efectúan la jugada N.º 1, y se supone que las blancas responden con la N.º 7. Las reglas heurísticas instruyen al programa para que abandone la búsqueda siempre que una de las respuestas blancas conduzca a éstas a puntuaciones superiores a la mejor de las respuestas examinadas hasta entonces. Por consiguiente, el programa abandona el examen de las jugadas 2, 3, 4 y 5 tan pronto descubre que hay respuestas de las blancas que producen posiciones de valor menor que 0, que es el valor de la mejor posición a que tienen acceso las blancas tras la jugada N.º 1.

va internamente registro de sus propiedades y posiciones.) Además, SHRDLU puede responder a preguntas que el usuario dactilografía en el terminal, puede ejecutar órdenes concernientes a los objetos de su sencillo entorno, llamado "mundo de bloques", e informar de los resultados.

Para comprender cómo SHRDLU llega a formular un plan de acción, supongamos que el programa pudiera solamente ejecutar dos acciones, llamadas APILAR y DESPEJAR. El programa ejecuta la orden APILAR asiendo un objeto, trasladándolo hasta un punto situado por encima de un segundo objeto y colocándolo después sobre este último. La orden DESPEJAR lleva a cabo la remoción de un objeto colocado sobre otro; su ejecución exige asir el objeto superior, trasladarlo hasta una zona desocupada del tablero y dejarlo allí.

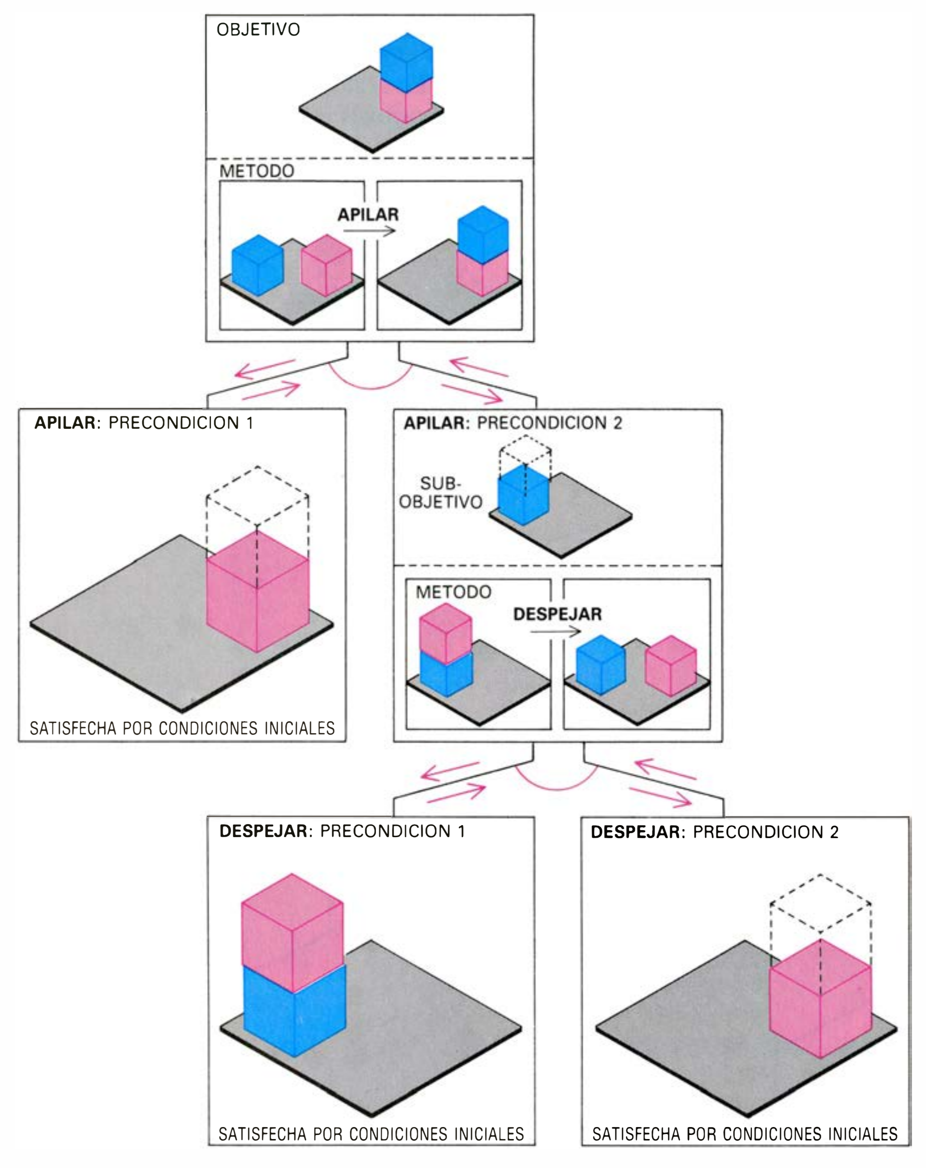
En realidad, APILAR y DESPEJAR representan sistemas jerarquizados de acciones. En el nivel de detalle inmediato encontramos acciones secundarias, como ASIR, TRASLADAR y COLOCAR. Cada una de estas sub-acciones está a su vez compuesta de una secuencia de pasos aún más detallados, hasta que finalmente los pasos pueden ser expresados por señales de control para actividades tales como cerrar "dedos" mecánicos, sentir el contacto con objetos, o hacer girar articulaciones. Por tanto, la jerarquía de enunciados del programa refleja la estructura jerárquica de las acciones humanas, desde las metas conscientes, de alto nivel, hasta las secuencias detalladas de control motor. En lo sucesivo omitiré todos los detalles relativos a tal control y comentaré solamente los planes formulados por el programa al más alto nivel.

Antes de poder ejecutar la acción APILAR han de satisfacerse dos requisitos: las caras superiores de los dos objetos que deben ser apilados han de estar libres. Análogamente, hay dos condiciones previas para poder ejecutar la acción DESPEJAR. El objeto cuya tapa superior ha de quedar despejada debe tener otro (pero sólo uno) descansando sobre él, mientras que la tapa del objeto a retirar debe estar despejada. A fin de seleccionar acciones capaces de alcanzar cierto objetivo o sub-objetivo, el programa compara el objetivo o subobjetivo con un sistema de "pos-condiciones" asociadas con cada acción. Tales pos-condiciones especifican qué configuración del mundo de bloques se producirá en virtud de esa acción. Si la configuración satisface las condiciones del objetivo o sub-objetivo, la acción propuesta entra a formar parte del plan.

Supongamos que un cubo rojo se encuentra descansando sobre otro azul. ¿Cómo podrá el programa sacar partido de las acciones APILAR y DESPEJAR para lograr la meta de colocar el cubo azul sobre el rojo? Partiendo del estado "objetivo final", el programa busca una acción cuyas pos-condiciones sean acordes con el objetivo y establece con carácter de objetivos secundarios las precondiciones de la acción. La acción APILAR podría colocar el cubo azul sobre el rojo (objetivo) si las bases superiores de uno y otro estuvieran despejadas. En el estado inicial dado la tapa del cubo rojo está desocupada, pero la del cubo azul no. Por tanto, desocupar la tapa del cubo azul pasa a ser un nuevo sub-objetivo.

Encadenamiento retrógrado

El programa continúa explorando, en busca de acciones que logren cada



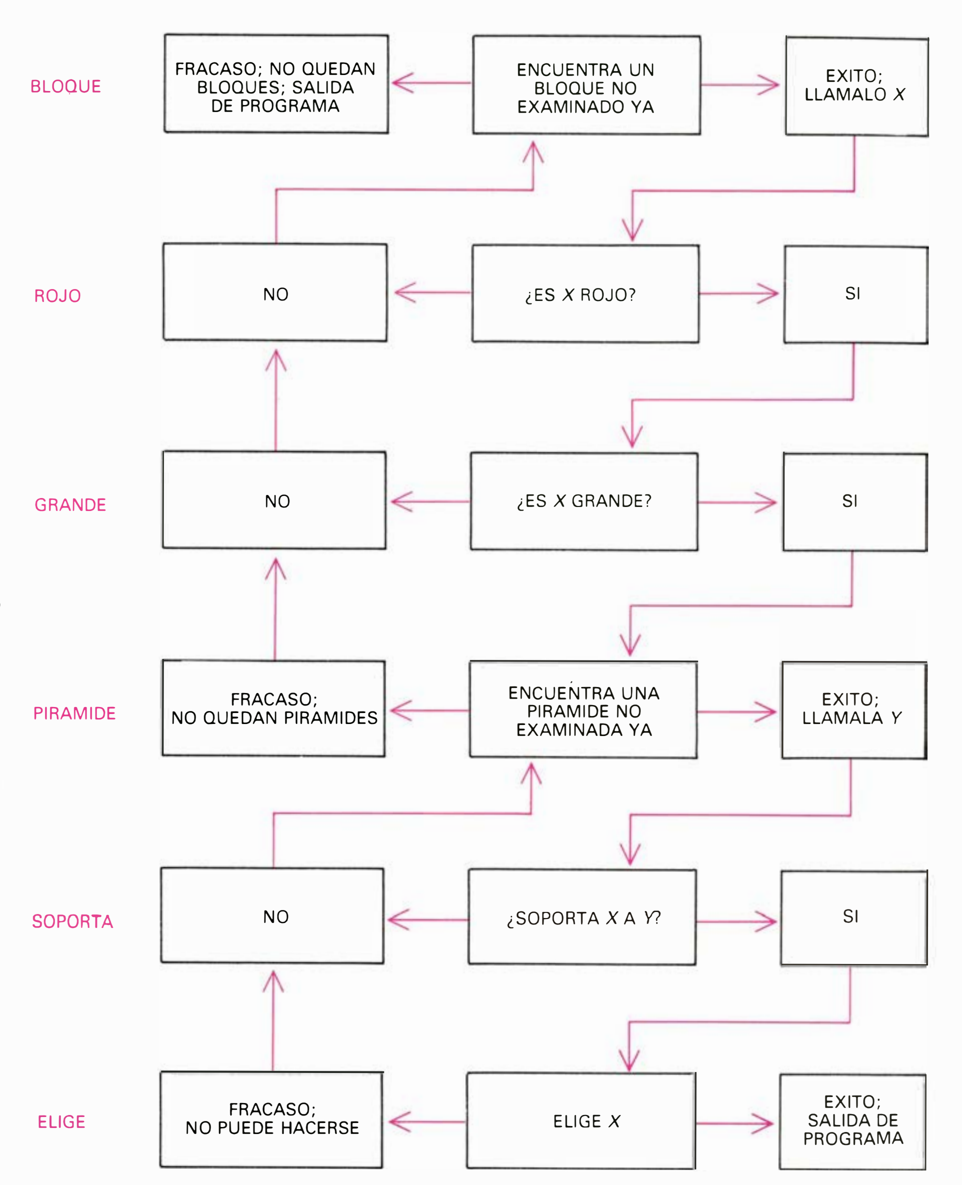
FORMULAR UN PLAN CONCRETO EN EL MUNDO DE BLOQUES exige reconocer y determinar un objetivo y elegir una sucesión de acciones conducentes al logro del objetivo partiendo de un estado inicial dado. En el ejemplo, el bloque rojo descansa inicialmente sobre el azul. El objetivo es colocar el bloque azul sobre el rojo. Para poner a punto un plan de acción, el programa realiza una búsqueda equivalente a la exploración de una estructura arbórea. El nudo del árbol representa un estado del mundo de bloques; la raíz es el objetivo, es decir, el estado en que el bloque azul descansa sobre el rojo. Del repertorio de acciones de que dispone el programa se selecciona una, tal como la acción APILAR. La acción seleccionada es aquélla cuyas consecuencias, o poscondiciones, se adaptan a las características fundamentales del estado; la acción está también asociada con el nudo. Los nudos situados en los extremos de ramas descendentes representan precondiciones, esto es, estados del mundo de bloques que deberán ser alcanzados antes de que la acción representada por el nudo pueda ser ejecutada. Cuando es preciso satisfacer precondiciones múltiples, éstas se conectan a través de un arco. Para emprender la acción APILAR, tanto el bloque azul como el bloque rojo han de tener sus tapas despejadas. El programa determina que la primera precondición está ya cumplida en el estado inicial, pero que la segunda no lo está. Por tanto, para despejar la tapa del bloque azul habrá de aplicarse otra de las acciones del repertorio, cuyas precondiciones tendrán que ser comparadas con las condiciones iniciales. Cuando todas las precondiciones de cada nudo explorado por el programa quedan satisfechas por las condiciones del estado inicial, la secuencia de acciones descubiertas durante la búsqueda se invierte, dando así un plan que logrará el objetivo final.

objetivo, y estableciendo a su vez las precondiciones para cada una de las acciones necesarias. Para desocupar la tapa del cubo azul podría aplicarse la acción DESPEJAR. Las condiciones previas para tal acción están ya satisfechas en el estado inicial del mundo de bloques, y, por tanto, la búsqueda está completa. El proceso entero de ir construyendo una sucesión de acciones que desde el estado objetivo vaya retrogradando hasta un estado donde todas las condiciones iniciales necesarias para dar comienzo a la cadena queden satisfechas se llama encadenamiento retrógrado.

El programa puede ahora preparar un plan de acción encaminado al objetivo, invirtiendo la secuencia de acciones descubiertas durante el proceso de búsqueda. El plan consiste en aplicar, primero, DESPEJAR para retirar el cubo rojo de lo alto del cubo azul, y luego emplear APILAR para colocar el cubo azul sobre el rojo. Uno de los efectos del plan es que lo alto del cubo azul queda despejado, cambio de situación producido por el plan, pero que no era una de sus finalidades explícitas. Tales cambios se llaman efectos secundarios del plan.

Una de las aplicaciones más recientes e intrigantes de la búsqueda por encadenamiento retrógrado ha sido el desarrollo de programas capaces de beneficiarse del conocimiento de humanos expertos e interactuar con el operador. Estos programas han demostrado ser capaces de comportarse como expertos, y por ello han sido llamados sistemas expertos. Se han aplicado programas de este tipo a problemas de diagnóstico clínico, prospección de minerales y asesoramiento fiscal. Por ejemplo, si el objetivo es diagnosticar enfermedades, el programa va retrocediendo desde informaciones de carácter general acerca del estado del paciente hacia hechos cada vez más específicos, y así hasta que la cadena de hechos puede justificar una inferencia francamente plausible acerca de la enfermedad de que se trate. Por tanto, los sistemas expertos cargan más el acento en desarrollar un plan para hacer inferencias plausibles fundadas en información facilitada por el usuario, que en desarrollar un plan de actuación. Las posibles inferencias quedan almacenadas, con carácter de reglas, en el programa, donde ocupan un lugar semejante al de las acciones del SHRDLU.

Tenemos un buen ejemplo de una tal regla en el sistema de diagnóstico clínico llamado MYCIN, preparado por Edward H. Shortliffe, de la Universidad de Stanford: "Si la infección es bacteremia primaria, y si el lugar del cultivo es uno de los lugares estériles, y si el lugar de penetración del organismo es el tracto gastrointestinal, entonces hay pruebas que sugieren que la identidad (0,7) del organismo es bacteroide".



LA COMPRENSION DE ORDENES se consigue en el programa SHRDLU gracias a procedimientos semejantes al que muestra este diagrama de flujo. Las palabras clave de la orden "Elige un bloque rojo grande que soporte una pirámide" inician una serie de pasos lógicos que determinan a qué bloque en cuestión se refiere la orden dada. Seguidamente SHRDLU generará un plan para ejecutar dicha orden.

Tal regla es, en su forma, muy semejante a las reglas que las personas mencionan al explicar sus decisiones; así pues, a los expertos les ha sido relativamente fácil aprender a escribir las reglas utilizadas por los sistemas expertos. Conviene que, a cada regla, se le asigne un coeficiente numérico que mida el grado de confianza (0,7 en el ejemplo anterior). Este coeficiente de confianza es base de los controles heurísticos que guían el proceso de búsqueda del programa hacia una inferencia plausible; se le suministra además al usuario para que éste pueda ponderar la validez de las diversas conclusiones a que el programa llega. El programa debe explicar también por qué llegó a la conclusión a que ha llegado. Nadie confiaría en un programa que se limitara a imprimir su conclusión sin decir por qué rechazó otras que pudieran parecer razonables.

Aprendizaje en el mundo de bloques

A menos que el ordenador pueda ampliar sus propias capacidades a base de "experiencia", el rendimiento de los programas estará limitado por el conocimiento, previsión y tiempo disponible del programador. Por consiguiente, la capacidad de aprender reviste excep-

¿Querrás apilar, por favor, los dos bloques rojos y, con ellos, un cubo verde o una pirámide?

Con gusto.

¿Qué cubo descansa sobre la mesa?

El cubo verde grande que soporta a la pirámide roja.

Pon un cubo pequeño sobre el cubo verde que soporta una pirámide.

Muy bien.

Coloca sobre él la pirámide más pequeña.

De acuerdo.

¿Cuántas cosas están situadas por encima de los cubos verdes?

No estoy seguro del significado de "por encima" en la frase "por encima de los cubos verdes".

Quiere Vd. decir:

1 — Directamente, en contacto con su superficie.

2 — En cualquier lugar más alto.

2

Hay tres.

¿Has tocado alguna pirámide antes de colocar la verde sobre el cubo pequeño?

Sí, la verde.

¿Cuándo la tomaste?

Mientras estaba apilando el cubo rojo, un bloque rojo grande y un cubo verde grande.

¿Porqué?

Para desembarazarme de ella.

¿Por qué hiciste eso?

Para despejar el cubo rojo.

¿Por qué despejaste ese cubo?

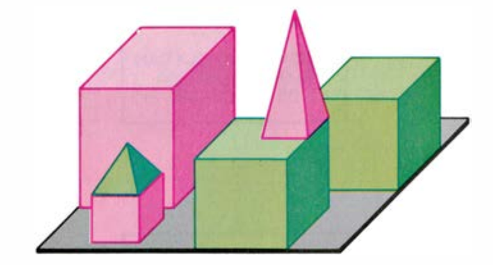
Para colocarlo sobre un cubo verde grande.

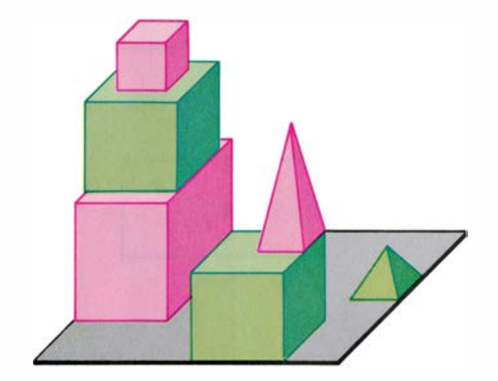
¿Por qué hiciste eso?

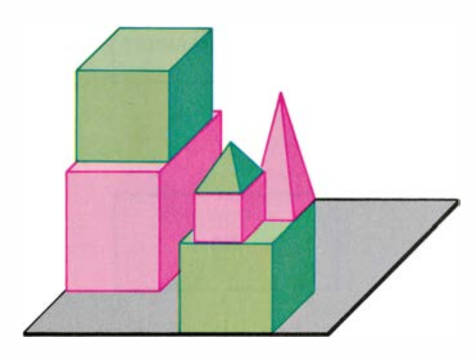
Para apilar el cubo rojo, un gran bloque rojo y el cubo verde grande.

¿Por qué hiciste eso?

Porque Vd. me lo pidió.







POR SU EXTREMA SIMPLICIDAD, el mundo de bloques consiente que el programa SHRDLU dé una gama de respuestas amplia y flexible a preguntas del programador. El programa es capaz de planear y ejecutar la manipulación de los objetos de su mundo al serle ordenado por el programador. Conforme el programador va dando las órdenes enumeradas a la izquierda de la ilustración (*texto en negro*), el estado inicial del mundo de bloques (*derecha*, *arriba*) es transformado para reflejar las acciones llevadas a cabo por el programa (*figuras central e inferior*). En el curso del diálogo, el programa interroga al usuario acerca de una cuestión ambigua, y responde a preguntas relativas al estado del mundo de bloques, de sus propias acciones y de los motivos que tuvo para llevarlas a cabo (*texto en rojo*). El programa SHRDLU fue uno de los primeros en combinar capacidad de comprensión lingüística y simulación de acciones.

cional importancia en inteligencia artificial. Cierto número de investigadores han adoptado el mundo de bloques de Winograd a modo de laboratorio donde explorar diversas estrategias de aprendizaje.

Un tipo de aprendizaje está basado en la "memorización" de un plan formulado tras una búsqueda por encadenamiento retrógrado. Los primeros en desarrollar esta idea fueron Richard E. Fikes y Nils J. Nilsson, ambos del Stanford Research Institute, para el sistema STRIPS (iniciales de *S*tanford *R*esearch *I*nstitute *P*roblem *S*olver). Supongamos que un programa hubiera de alcanzar el estado objetivo en que un bloque marrón descansa sobre uno verde, y que encuentra un estado en el que un bloque verde descansa sobre uno marrón. Habiendo antes intercambiado los bloques azul y rojo, el programa almacena una representación del plan que desarrolló antes para efectuar el cambio, a saber, emplear primero la acción DESPEJAR y después la acción APILAR. La representación del plan debe ser una representación generalizada, pues de lo contrario solamente podría ser aplicable a los bloques rojo y azul con que se encontró antes. La generalización se consigue almacenando como cantidades variables los nombres de los bloques a intercambiar. La acción completa, que aquí llamados INTERCAMBIAR, se añade entonces al repertorio de acciones posibles del programa, y consiste en ejecutar en secuencia fija las acciones más sencillas ASIR, TRASLADAR y COLOCAR, juntamente con las nuevas precondiciones y poscondiciones de la acción INTERCAMBIO. Dado que el estado inicial de los bloques marrón y verde satisface las precondiciones de INTERCAMBIAR, el programa puede alcanzar el estado objetivo inmediatamente, sin búsqueda.

Un segundo tipo de aprendizaje se basa en tanteos, a base de ensayo y error. Un modelo de este tipo es el programa HACKER, escrito por Gerald J. Sussman, del MIT. Este programa se compone de un sistema de planificación semejante al de SHRDLU, de "críticos" que supervisan la planificación y ponen de manifiesto las dificultades y errores y "depuradores" que formulan para los programas nuevas reglas, para evitar repetir los errores detectados por los críticos.

Supongamos que un bloque rojo se halla descansando sobre otro azul, y que sobre la mesa se encuentre, solitario, un bloque verde. Se le pide a HACKER que construya un apilamiento de tres bloques, donde el bloque rojo esté en lo alto, el verde, en medio, y el bloque azul, abajo. El programa dispone solamente de las acciones APILAR, DESPEJAR e INTERCAMBIAR. Para la planificación de sus acciones, HACKER descompone el objetivo en sub-objetivos. Como primer sub-objetivo puede elegir, bien colocar el bloque rojo sobre el verde, bien colocar el bloque verde sobre el azul. Supongamos que el programa comienza arbitrariamente eligiendo el sub-objetivo erróneo, a saber, colocar el bloque rojo sobre el verde. El programa toma nota de que tal sub-objetivo puede lograrse con la acción APILAR. Su siguiente sub-objetivo ha de ser colocar el bloque verde sobre el azul. Sin embargo, no podrá tomar el bloque verde mientras éste sea soporte del bloque rojo, porque la operación APILAR exige que la tapa del bloque verde esté despejada. Para apilar el bloque verde sobre el azul, el programa debe primero retirar el bloque rojo situado sobre el verde, desmantelando el objetivo recién alcanzado.

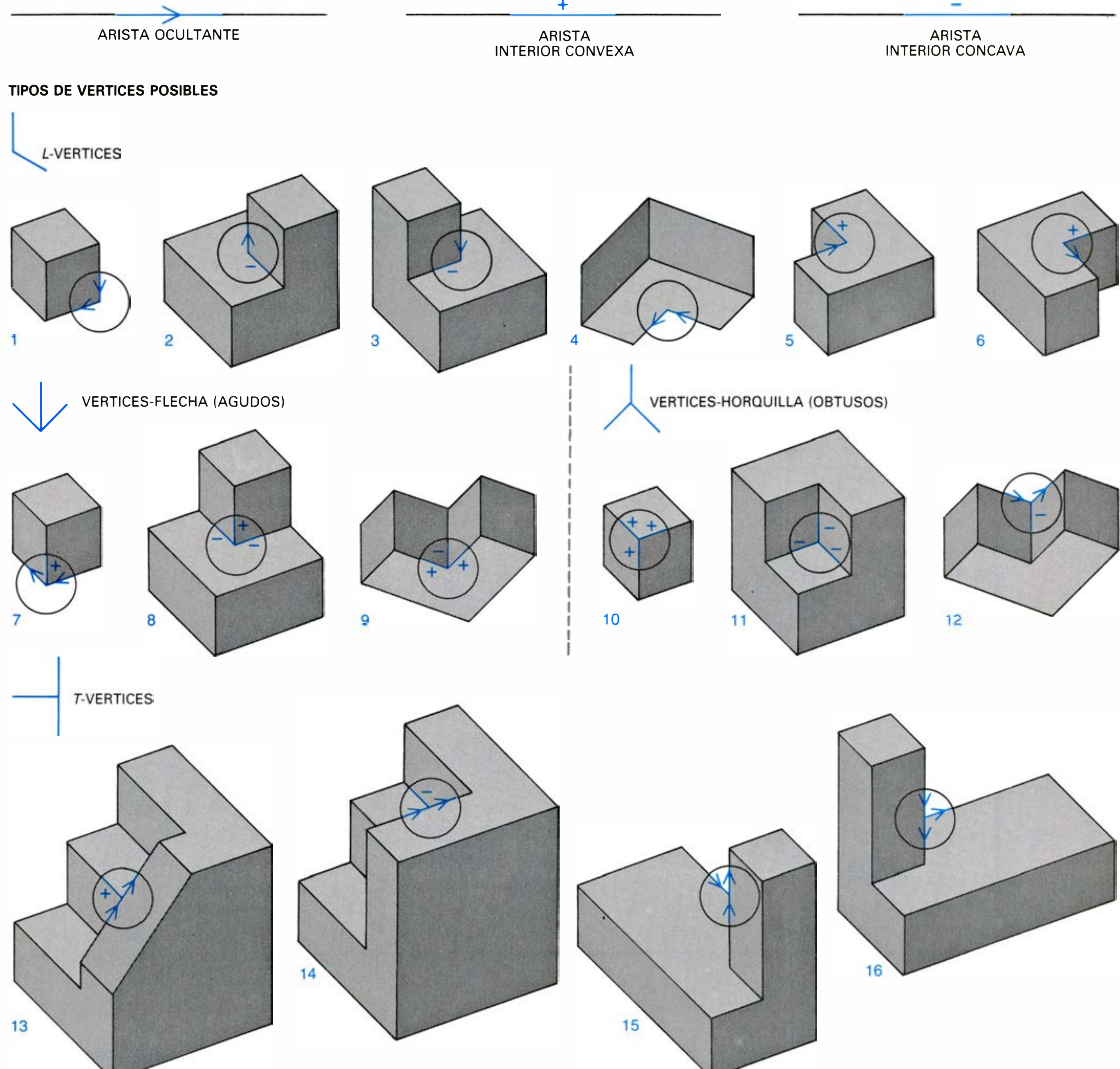
Los "críticos" incorporados a HACKER están programados para hacer actuar a los "depuradores" tan pronto detectan que un sub-objetivo ha sido desmantelado. Los depuradores buscan otras alternativas de planificación; en este caso descubren que si se coloca primero el bloque verde sobre el azul, el plan funciona sin desmantelar sub-objetivo alguno. Los depuradores pueden sacar entonces la conclusión de que en ocasiones se evitará el desmantelamiento de sub-objetivos reordenándolos. El programa HACKER toma nota de esta conclusión, incluyéndola como procedimiento de depuración nuevo y general. El programa de Sussman acabó por

aprender a ordenar los sub-objetivos para pilas formadas por un número arbitrario de bloques.

Aprendizaje de conceptos

Cierto número de programas permiten a un ordenador ejecutar acciones o formar representaciones más adecuadas de conceptos. Uno de los primeros que logró mejorar su propio rendimiento fue un programa para jugar a las damas, escrito por Arthur L. Samuel, de la International Business Machines Corporation, hacia 1960. En el programa, el proceso de aprendizaje estaba diseñado para que simulase los procesos de evolución y selección natural. Una versión del programa se enfrentaba a otra versión en la cual el sistema de puntuación para evaluar la fuerza de una posición había sido ligeramente modificado. De esta manera, un sistema de evaluación dado y una "mutación" del sistema fueron ensayados en competición directa; la versión ganadora fue conservada como base para construir nuevas variantes.

A finales del decenio de los sesenta, Patrick H. Winston, del MIT, escribió un programa que va sucesivamente perfeccionando su maestría y dominio de ciertos conceptos. Un instructor le pre-

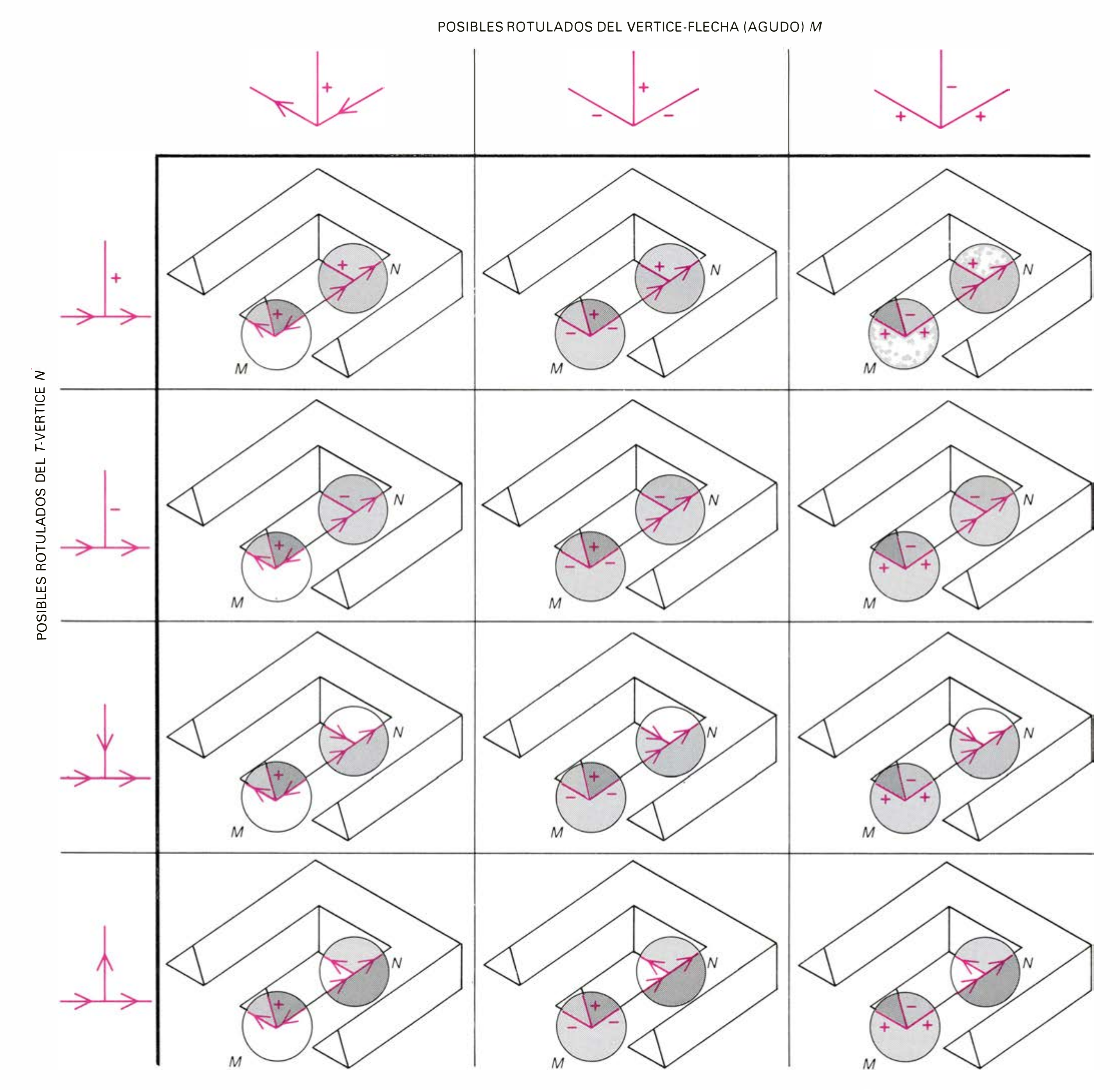


EL RECONOCIMIENTO de que un dibujo lineal bidimensional representa una vista en perspectiva de un cuerpo tridimensional puede conseguirse mediante un programa de ordenador que aplica sobre los vértices del dibujo un esquema de rotulado. Se supone que cada trazo rectilíneo del dibujo representa, ya una arista ocultante de un objeto visto en perspectiva, ya una arista prominente hacia el observador (una arista convexa), ya una arista cóncava. Además, en ningún punto concurren más de tres planos. Las aristas ocultantes son bordes de planos ocultantes, esto es, planos del exterior del objeto o planos situados frente a otro plano del objeto cuando se lo mira desde el punto de observación. Por convenio, las aristas ocultantes se señalizan mediante flechas, y el plano ocultante se encuentra entonces a la derecha de la arista cuando se mira en el sentido de la flecha. Los vértices pueden ser de cuatro categorías, con 16 tipos en total. Cada uno de los vértices de la figura ha de ser clasificado en uno de estos 16 tipos antes de que pueda proseguirse con la interpretación de la figura como objeto tridimensional. Los primeros en proponer esquemas de rotulación como éste fueron David A. Huffman, del MIT, y Max B. Clowes, de Sussex. Posteriormente, tal esquema sería generalizado por el autor para permitir reconocer grietas, sombras y aristas de otros tipos.

senta al programa una serie de escenas cuidadosamente graduadas, dispuestas de forma que la primera sea buen ejemplo del concepto que el programa ha de aprender. El programa analiza la primera escena y elabora una "hipótesis" acerca de qué componentes y qué relaciones entre ellos son elementos esenciales del concepto. En cada escena subsiguiente, el instructor le va diciendo al programa si la escena es o no un ejemplo aceptable del concepto. El programa va comprobando y revisando su hipótesis inicial conforme le va siendo presentada cada nueva escena.

Supongamos que al programa se le presenta un sencillo dibujo lineal y se le dice: este dibujo es un ejemplo de arco [*véase la ilustración de la página 59*]. El programa observa que el objeto representado en el dibujo consta de tres bloques; dos de ellos están erectos sobre la mesa y sostienen al tercero. Aunque el programa pudo haber conjeturado muchas otras propiedades del ejemplo que también son válidas para los arcos en general, su concepto de arco está deliberadamente empobrecido para que luego, con el análisis de diferentes escenas, pueda ser mejor perfilado.

La segunda escena no es un arco. El programa construye nuevamente una descripción de la escena y la compara con la hipótesis que elaboró a partir del primer ejemplo. Si la segunda escena no difiere de la primera en demasiadas cosas, el programa puede empezar a determinar qué relaciones son esenciales al concepto de arco. Si la segunda escena es idéntica a la primera salvo en que el bloque anteriormente situado en lo alto de los otros dos ahora yace sobre la mesa, el programa infiere que en un arco los dos bloques erectos han de sostener al tercer bloque. El programa ha



CUANDO UNA ARISTA recibe siempre rotulados incompatibles cualesquiera que sean las combinaciones de rotulados de vértices que se ensayen, el dibujo bidimensional no puede ser visto en perspectiva de un cuerpo tridimensional. En el dibujo del objeto imposible conocido por "horquilla del diablo" se han ensayado todas las combinaciones de rotulación de los vértices que limitan el segmento *MN*; ninguna de ellas da un mismo rotulado a toda la longitud de *MN*. Por otra parte, existen dibujos que admiten rotulaciones coherentes, aunque no pueden representar objetos tridimensionales.

aprendido que la relación de soporte entre los bloques inferiores y el superior no es un aspecto incidental de la primera escena, y la hipótesis acerca del concepto de arco se pone al día para reflejar este hallazgo. Conforme se van presentando escenas adicionales, la representación que del concepto hace el programa va adaptándose mejor para reconocer nuevos ejemplos de arcos.

Recientemente, un programa llamado AM (iniciales de "*A*utomated *M*athematics"), desarrollado por Douglas B. Lenat, de Stanford, es capaz de formular conceptos nuevos y teoremas matemáticos a partir de unos 100 conceptos elementales de teoría de conjuntos. En él hay principios heurísticos que especifican la creación de nuevos conceptos bajo condiciones bien definidas, y el programa procede entonces a investigar los conceptos recién creados. Durante uno de sus pases por ordenador, AM examinó el concepto de divisores de un número. Descubrió que varios números tienen cuatro o más divisores (por ejemplo, los divisores de 6 son 1, 2, 3 y 6), pero las reglas heurísticas confinaron la investigación a números con sólo unos cuantos divisores.

Al examinar los números que tienen exactamente tres divisores, el programa descubrió que todos los ejemplos considerados eran también cuadrados perfectos. Además, el programa descubrió que la raíz cuadrada de un número con tres divisores era siempre un número con exactamente dos divisores. A causa de la coincidencia del concepto "raíces cuadradas de números con tres divisores" y el concepto "números con exactamente dos divisores", el programa elevó en su agenda la prioridad de ambos conceptos y decidió examinar con mucho mayor detalle los números con exactamente dos divisores. De esta forma, AM comenzó a explorar el rico entramado de relaciones matemáticas que arrancan del concepto de número con exactamente dos divisores, conocidos normalmente por números primos. En aproximadamente una hora de funcionamiento en ordenador, el programa de Lenat llegó a reproducir varias conocidas conjeturas sobre números primos, y adivinó que todo número natural es producto de un único conjunto de números primos.

Propagación de restricciones

El tipo de exploración que he descrito para programas ajedrecísticos y programas de planificación es un proceso serial (o secuencial) y, por ello, el tamaño del árbol que puede ser explorado está limitado por el tiempo necesario para ir evaluando por turno, uno tras otro, los nodos del árbol. En algunos casos, procesos que parecen exigir la exploración serial del árbol pueden ser reconvertidos en procesos "en paralelo" donde varios aspectos de la búsqueda, mutuamente independientes, son considerados a un mismo tiempo. Gran parte del procesamiento de señales que efectúa nuestro cerebro se realiza en paralelo, y muchos investigadores opinan que los programas que incorporen procesamiento en paralelo serán mucho más capaces de simular las capacidades sensoriales de los humanos que los programas de procesamiento serial. Cierto número de programas de inteligencia artificial han experimentado con un proceso paralelo llamado propagación de restricciones, de los cuales el autor fue uno de los primeros en presentar un ejemplo, que fue objeto de su tesis doctoral, en el MIT, en 1972. Este programa estaba redactado en LISP, un lenguaje de programación hoy empleado para casi todos los trabajos de inteligencia artificial.

Una de las cosas que las personas aprenden a hacer casi inmediatamente es a interpretar dibujos lineales bidimensionales como escenas tridimensionales. En mi tesis doctoral yo me proponía poner a punto un programa capaz de remedar esta facultad de los humanos. Trabajos previos e independientes, debidos a David A. Huffman, del MIT, y al fallecido Max B. Clowes, de la Universidad de Sussex, habían mostrado que bajo ciertas hipótesis simplificadoras, un dibujo lineal podía ser interpretado como escena tridimensional en el caso exclusivo de que todos sus vértices puedan ser coherentemente rotulados echando mano de un conjunto de 16 tipos de vértices permisibles. El esquema puesto a punto por Huffman y Clowes sólo es aplicable a dibujos de objetos cuyas superficies sean todas planas, y en las que ningún vértice sea intersección de más de tres planos. Cada una de las rectas que parten de un vértice han de ser rotuladas ya como arista ocultante, ya como arista convexa (que sobresale hacia el observador) o ya como arista cóncava (exactamente a la inversa).

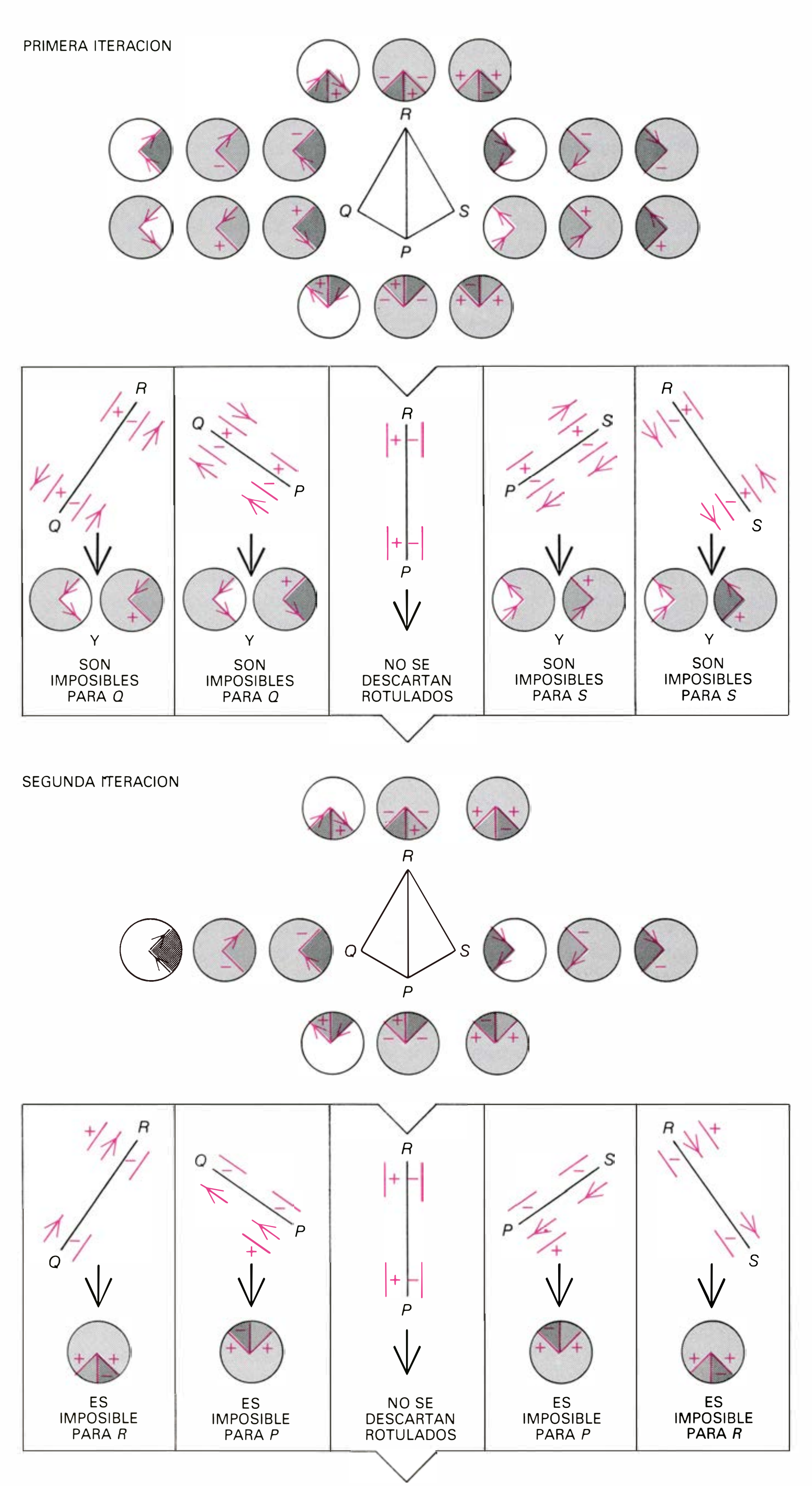
Una escena puede quedar coherentemente rotulada si, estando cada vértice rotulado, cada arista tiene asignado un único rótulo. Si dos vértices conectados por una sola arista no pueden ser rotulados de manera que la arista quede inequívocamente caracterizada, el dibujo no puede representar un objeto tridimensional real. Tenemos un ejemplo de dibujo que no puede ser coherentemente rotulado en la llamada "horquilla del diablo", que parece en principio representar un objeto sólido, pero que al ser examinado más atentamente produce una desconcertante paradoja visual. El esquema de rotulado le permite al programa descartar la posibilidad de que tal dibujo represente un objeto, y ayuda también a deshacer la paradoja.

Rotulación arborescente

Los primeros programas para clasificar los vértices de un dibujo lineal efectuaban una exploración serial de un árbol de búsqueda, tratando de hallar una rotulación globalmente coherente. A partir de un vértice cualquiera, los programas iban asignando al vértice todos los rotulados posibles. Para cada uno de éstos, los programas pasaban a un vértice adyacente, y asignaban al segundo vértice todos los rotulados que fuesen coherentes con el elegido para el primero. Para cada uno de los rotulados coherentes de los dos primeros vértices, el programa determinaba rotulados compatibles para un tercer vértice, adyacente al segundo. El procedimiento continuaba sucesivamente, pasando por todos los vértices, hasta agotar todos los nudos del árbol de búsqueda. Cada ramal de la búsqueda acababa, bien cuando ya no era posible seguir rotulando vértices coherentemente, bien cuando todos los vértices habían quedado coherentemente clasificados. (En ciertos dibujos puede suceder que los vértices admitan ser rotulados coherentemente de más de una manera; tales dibujos les resultan también ambiguos a los observadores humanos.)

Los métodos de exploración arborescente pueden ir bien cuando el número de rótulos de los vértices es pequeño. Yo me proponía que mi programa supiera distinguir grietas, sombras y aristas de otros tipos, que los programas anteriores no podían interpretar correctamente. Sin embargo, al admitir nuevos tipos de arista, el número de rótulos posibles para los vértices se hace muy grande: alrededor de 100 para vértices de cierto tipo, y más de 1000 para los de otros tipos. Una escena de sólo cuatro vértices puede admitir, en principio, más de 1000^4 (o sea, un billón) de rotulados potenciales. Y si bien es cierto que la exploración del árbol completo correspondiente a la escena no tendría que considerar todos y cada uno de los esquemas de rotulado (dado que muchos de ellos resultarían contradictorios antes de llegar al último vértice), la búsqueda seguiría siendo de tamaño inabordable.

Decidí, por consiguiente, que mi



PROPAGACION DE RESTRICCIONES al ir rotulando vértices. Puede analizarse en paralelo, de forma muy semejante a como el cerebro humano procesa ciertas señales. A cada vértice se le asignan todos los rotulados posibles, y cada posible rótulo es comparado con todos los rótulos posibles de un vértice situado en el otro extremo de un segmento que los conecta. Si el segmento no puede ser rotulado coherentemente, de suerte que tenga la misma señalización en ambos extremos, todos los rotulados de vértices que produzcan contradicción sobre el segmento habrán de ser eliminados. Las restricciones sobre el rotulado de los segmentos vienen dadas solamente por los símbolos de color; el sombreado fue añadido para mayor claridad. Como el proceso puede efectuarse independientemente para cada segmento, todos ellos pueden analizarse simultáneamente. Una vez determinadas todas las restricciones de cada vértice, se las combina entre sí. Los rótulos que aún subsisten se aplican nuevamente a los vértices, y el procedimiento se repite.

programa debería eliminar todos los rotulados imposibles de cada vértice antes de emprender la exploración del árbol. El programa asigna a cada vértice todos los rótulos que son posibles. Seguidamente examina cada par de vértices conectados por una línea. En vista de que la línea sólo puede llevar una denominación, algunos de los rotulados de vértices adyacentes podrán ser eliminados. En efecto, puede resultar que un rótulo de uno de ellos no sea compatible con ninguno de los permitidos para el vértice adyacente. Cada examen por pares de los rótulos es independiente del de los demás, y, por ello, en esta parte del programa el procesado se efectúa en paralelo. Una vez concluida la primera ronda eliminatoria de rotulados de los vértices, los rotulados supervivientes son reasignados y vueltos a examinar por pares, también en paralelo. De esta forma, las restricciones detectadas en la primera ronda son propagadas a la segunda y sucesivas.

Inicialmente tuve la intención de valerme de la eliminación de rotulados por pares, aunque sólo fuera para podar el árbol de exploración y reducirlo a un tamaño manejable. En la primera escena en que lo ensayé descubrí que el proceso reducía a uno el número de rotulados por vértice. Era, por tanto, innecesario en ese ejemplo el árbol de búsqueda.

Tal descubrimiento me sorprendió, tanto, que cuando el programa dio a los vértices de varias escenas rotulados únicos creí que sería debido a un error de concepción. Además, si en lugar de haber escrito el programa para hacerlo funcionar sobre ordenador, hubiera yo intentado efectuar a mano el rotulado, seguramente no habría descubierto que podía prescindir del árbol de exploración. El rotulado manual más sencillo exigiría examinar alrededor de 10.000 rotulados de los vértices; en una empresa tan tediosa resulta casi inevitable cometer algún error. Raramente se tiene en cuenta fuera de las ciencias de cómputo la posibilidad de tales hallazgos inesperados, que no son en absoluto infrecuentes.

Posteriores intentos de aplicar mi programa a escenas más verosímiles han demostrado también que la experimentación es faceta esencial de la investigación en inteligencia artificial. Aunque el programa mostró un comportamiento eficiente y elegante en las escenas donde se aplicó en un comienzo, el trabajo no ha podido generalizarse bien a escenas que contengan objetos curvos, texturas, superficies brillantes y otras características de los objetos reales.

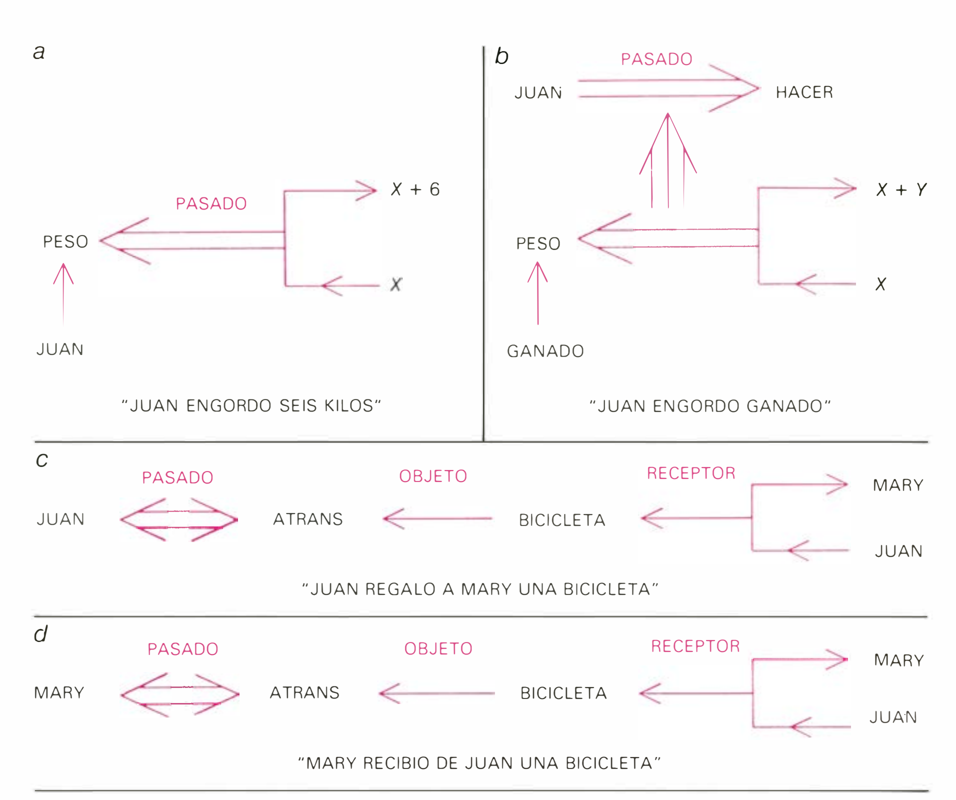
A David C. Marr, que fuera del MIT, se deben los resultados más recientes e impresionantes para dotar de "visión" a los ordenadores. Puso a punto modelos de las operaciones de la corteza visual del cerebro que pueden ser necesarias para manejar escenas en toda su complejidad. No obstante, se han empleado técnicas afines a las de mi trabajo para analizar circuitos electrónicos, para efectuar correlaciones estereoscópicas de dos vistas de una misma escena, para comparar rasgos detallados de una escena con otros rasgos vecinos y para reducir la ambigüedad de ciertas frases del lenguaje.

Comprensión del lenguaje

El medio de interacción humana con los ordenadores suele llamarse lenguaje. Empero, uno de los más difíciles retos que tiene planteada la disciplina de la inteligencia artificial es el de lograr programas que permitan a los ordenadores comprender el lenguaje natural ordinario. Incluso los más sencillos programas de comprensión del lenguaje son largos y complejos, mientras que, por otra parte, hasta los programas más potentes siguen confinados a dominios semánticos muy reducidos, en los que entienden solamente los significados más superficiales. No obstante, este campo es de suma importancia, no siendo la menor de las razones la de que un programa que tuviera éxito estaría simulando procesos que parecen encontrarse cercanos a la esencia misma del pensamiento humano.

Los primeros trabajos sobre comprensión del lenguaje a cargo de programas de ordenador comenzaron en los años cincuenta, encaminados a la mecanización de traducciones. El enfoque general dado al problema fue el de suministrar para cada palabra del texto a traducir un equivalente tomado del diccionario; se añadían reglas sencillas para reordenar las palabras de la traducción y mejorar la sintaxis. Fue un fracaso. Se dice que cuando la frase "El espíritu está pronto, pero la carne es débil" fue traducida del inglés al ruso, y luego del ruso al inglés, el resultado fue: "El vodka es fuerte, pero la carne está podrida". Quedó demostrada la imposibilidad de traducir bien sin comprender el significado. A mediados de los sesenta, el trabajo en este campo había sido abandonado casi por completo.

Otro de los primeros esfuerzos de comprensión del lenguaje fue un programa bautizado ELIZA, escrito por Josep Weizenbaum, del MIT, en 1966. ELIZA deja de lado el verdadero procesamiento lingüístico, basándose en cambio en un astuto sistema, con pautas de respuesta bastante fijas que dan una imitación de la comprensión lingüística que a mucha gente le resulta convincente. Las respuestas del programa recuerdan las de los psicoanalistas; cada respuesta es tomada de un repertorio de frases almacenadas, o de pautas de frases, que se van asociando con palabras o pautas de palabras tomadas de declaraciones hechas por el "paciente". Por ejemplo, cada vez que se menciona la palabra "madre", el programa responde con una de varias frases hechas, como "Cuénteme algo más acerca de su madre". Si el paciente escribe en el teclado "Me siento algo cansado", ELIZA puede insertar parte de la frase del paciente en su respuesta: ¿Por qué se siente usted algo cansado?".

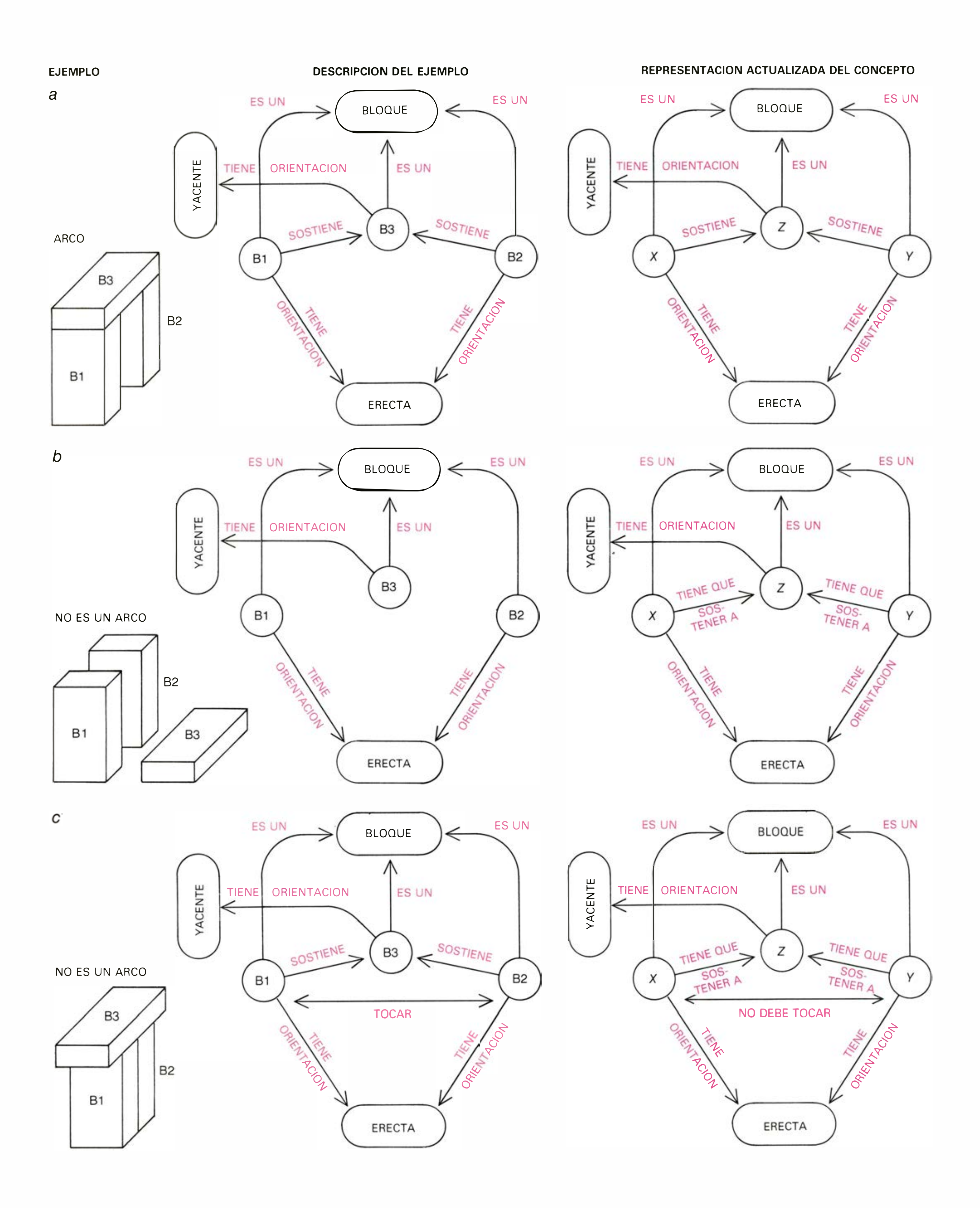


LOS DIAGRAMAS DE DEPENDENCIA conceptual representan la estructura semántica de las frases, de modo tal que frases superficialmente semejantes, aunque de significados diferentes, quedan representadas de distinta forma (*a*, *b*). Frases de significado parecido, aunque de estructura superficialmente diferente, quedan representadas de formas semejantes (*c*, *d*). Los diagramas muestran que la frase "Juan engordó seis kilos" se corresponde aproximadamente con "el peso de Juan pasó de cierto valor *X* kilos hasta el valor *X* + 6 kilos" (*a*), mientras que la frase "Juan engordó ganado" equivale sobre poco más o menos a "Juan realizó algo no determinado cuyo efecto fue que el peso del ganado aumentase de cierto valor *X* a cierto valor mayor que *X* en una cantidad *Y*" (*b*). La frase "Juan regaló a Mary una bicicleta" equivale aproximadamente a "Juan transfirió de sí mismo a Mary la posesión de una bicicleta" (*c*). (ATRANS es una clase de verbos relativos a la transferencia de posesión.) La frase "Mary recibió de Juan una bicicleta" admite una representación parecida (*d*), si bien ahora Mary es mencionada como agente que fue causa de la transferencia. Este sistema fue puesto a punto por Roger C. Schank, de Yale.

Aunque muchas de las palabras de "entrada" son despreciadas por el programa, hace falta todavía una biblioteca de pautas de significado muy grande para poder afrontar el gran número de entradas que potencialmente pudiera recibir. Más tarde, Weizenbaum argumentaría que su programa pone de manifiesto la insuficiencia de que para adscribir inteligencia a los programas se siga el criterio de ver la capacidad de éstos para simular conductas humanas. ELIZA, señalaba Weizenbaum, operaba a un nivel extraordinariamente simple y superficial y, no obstante, mucha gente, engañada por sus respuestas, caía en la trampa de referirle sus problemas personales, como si la máquina fuese su psicoanalista.

En torno a 1970, Roger C. Schank, de la Universidad de Yale, presentó programas para procesar frases del lenguaje natural humano, relativas a las acciones de éstos. Sus programas están basados en las que Schank llama primitivas de dependencia conceptual. Entre estas primitivas se cuentan MTRANS, que es el conjunto de todas las acciones donde hay transferencia de información mental, tales como decir, oír, escribir y leer; ATRANS, conjunto de acciones donde hay un cambio de posesión de objetos, como comprar, vender, tomar y dar; y ATTEND, para acciones de carácter sensorial, como observar, escuchar, oler y degustar.

Es posible representar el significado de una frase con un diagrama basado en dependencias conceptuales. Resulta



EL APRENDIZAJE de un concepto puede comprenderse como formulación de una hipótesis acerca de los aspectos del concepto que se descubren en un ejemplo concreto, más la revisión de tal hipótesis para ir acomodando en ella la información extraída de nuevos ejemplos. Para enseñar a un programa de ordenador el concepto de arco arquitectónico, el instructor le presenta al programa un ejemplo de lo que él quiere llamar "arco" (*a*). El programa describe la figura mediante una red semántica, esto es, una red de relaciones entre conceptos ya incorporados al programa. La primera hipótesis es una red semántica generalizada en la que a ciertas variables se les asigna como valor los componentes particulares de la figura. El instructor le presenta al programa nuevas figuras (*b*, *c*), que ahora no son arcos. El programa combina una descripción de cada imagen con la información de que no representa un arco, y revisa su hipótesis inicial. Es preciso elegir la sucesión de ejemplos; un ejemplo que difiera del anterior en demasiados elementos crearía "confusión" en el programa, que no sabría discernir qué aspectos son importantes y cuáles son accidentales. Programa desarrollado por Patrick H. Winston, del MIT.

que frases superficialmente parecidas, pero de significados distintos, tienen asociados diagramas muy diferentes. Los diagramas que representan la estructura semántica de una sentencia y de una paráfrasis de la sentencia son parecidos, aun cuando ambas sentencias sean superficialmente distintas. Además, las dependencias conceptuales organizan las "expectativas" que tiene un programa después de haber éste analizado parte de una frase. Por ejemplo, después del fragmento de frase "Juan dio" el programa espera que la frase mencione un objeto que ha sido dado, así como un receptor de la acción. Basándose en su conocimiento provisional de la frase, el programa crea espacios en blanco, preparados para recibir los elementos esperados.

Bastidores y guiones

El trabajo de Schank formaba parte de una tendencia de largo alcance, que considera que la comprensión del lenguaje es un proceso que se desarrolla de "arriba abajo", en el cual las palabras sirven de indicadores o señales que abren expectativas tomadas de nuestra memoria, o como confirmación o denegación de expectativas establecidas ya. Semejante opinión contrasta con otra anterior que suponía que el significado había de construirse de "abajo arriba", es decir, partiendo de la definición de las palabras, pasando por su significado en las frases y terminando por su adecuada función dentro de la oración.

En 1974, Marvin L. Minsky, del MIT, sugirió que no sólo el lenguaje, sino todo el pensamiento, pudiera depender fuertemente de procesos guiados por estructuras de "expectativa de conocimiento", que él llamaba "bastidores". Los bastidores, lo mismo que las primitivas de dependencia conceptual, están formados por un núcleo central más un conjunto de alojamientos. Cada alojamiento corresponde a cierto aspecto de, o participante en, un concepto implícitamente definido por el bastidor. Minsky afirmaba que una importante función del bastidor es representar estereotipos. El estereotipo es un modelo intuitivamente plausible del modelo por el cual las personas van insertando y acomodando información sobre situaciones no explícitamente mencionadas.

Hay en la actualidad cierto número de programas de comprensión lingüística que sacan partido de esta estrategia general. Por ejemplo, un programa escrito por Wendy G. Lehnert, de Yale, es capaz de responder a preguntas relativas a historias como ésta:

Juan tomó el autobús desde New Haven a Nueva York. Durante el viaje, un ratero le robó la cartera. Fue a un restaurante y pidió spaghetti. Juan no pudo pagar la cuenta y tuvo que fregar platos.

Aunque el párrafo enuncia tan sólo que Juan pidió spaghetti, casi todo el mundo daría por hecho, leída la historia, que Juan también se los comió. El programa de Lehnert hace también inferencias plausibles como esa, gracias a un "guión", que es un bastidor de tipo especial, donde las expectativas de contexto que casi todo el mundo tiene acerca de los restaurantes le son dadas explícitamente al ordenador.

Un programa llamado FRUMP, preparado por Gerald F. DeJong II, de Yale, es capaz de resumir noticias recibidas a través del servicio de teletipo de la agencia UPI. El programa contiene guiones para muchos sucesos, tales como terremotos, accidentes de circulación y visitas diplomáticas. DeJong, que actualmente se encuentra en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, está añadiendo al programa secciones que le permitan preparar su propio guión. Al programa podría dársele el siguiente fragmento: "María deseaba una radio nueva; ella fue al banco". El programa consultaría su guión sobre obtención de nuevos objetos y su guión sobre visitas a bancos, buscando información que enlace los dos miembros de la oración. El programa observaría que las radios nuevas cuestan dinero y que la gente va a los bancos a retirar dinero, y "razonaría", por tanto, que María probablemente fue al banco a buscar dinero para comprar la radio. Análogamente, si el programa no supiera nada de secuestros, podría poner a punto un plan para averiguar por qué habría alguien de querer raptar a una persona. Una vez finalizado y generalizado el análisis, el plan podría quedar añadido al programa a modo de guión sobre el tema de los secuestros.

Otras muchas cuestiones relativas a la comprensión del lenguaje han salido a escena recientemente. Se han desarrollado programas que intentan dar modelos de comprensión de metáforas, de comprensión de objetivos e intenciones no declaradas por el hablante y la apreciación de emociones y motivaciones subyacentes a personajes de cuentos y relatos. Otros programas tienen la finalidad de manejar informaciones incoherentes, así como juzgar la plausibilidad de enunciados.

Suele suceder que tales juicios sobre plausibilidad ocupen posición central para comprender el lenguaje ordinario. Antes de que un programa pueda comprender metáforas, captar el humor, detectar mentiras o exageraciones ha de reconocer que el sentido literal no es plausible en la situación dada. Las frases pueden dejar de ser plausibles por diversas razones. Por ejemplo, el complemento del verbo puede ser inadecuado a su acción, como en "Juan se comió las felicitaciones", o bien la frase puede declarar sucesos físicamente inverosímiles, como en "María dio un bote de tres metros al enterarse de la noticia". A mi juicio, los trabajos sobre enjuiciamiento de la plausibilidad pueden ser considerados como primeros pasos hacia la construcción de modelos del sentido común.

Sentido común

Probablemente, la más expresiva de las críticas que se han hecho a los trabajos que se están desarrollando en inteligencia artificial sea su incapacidad, hasta la fecha, para construir modelos del sentido común. Una de las dificultades que presenta la simulación del sentido común es que un tal programa debe encadenar conjuntamente percepción, razonamiento y acción, pues, a fin de cuentas, la aplicación inteligente de un concepto pasa por estos tres dominios. Los mejores programas actuales de comprensión lingüística ignoran literalmente de qué hablan; su único contacto con el mundo es a través del lenguaje.

Los mayores éxitos alcanzados en inteligencia artificial se han logrado allí donde ha sido posible identificar dominios restringidos y autónomos, como el mundo de bloques del SHRDLU. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que es imposible agrandar y generalizar de manera sencilla y directa tales programas. Las técnicas ingenieriles aplicadas hasta ahora no serán probablemente capaces de superar las dificultades inherentes al tratamiento de conocimientos incompatibles o contradictorios, procesamiento de escenas de la vida real o uso irrestricto del lenguaje.

Esta observación no pretende decir que los métodos ingenieriles no lleguen a ser de utilidad extraordinaria para comprender y desvelar los principios generales de la inteligencia. Empero, será preciso poner a punto modelos sustancialmente mejores de la cognición humana antes de que puedan prepararse programas capaces de afrontar versiones, siquiera sean simplificadas, de tareas que requieran sentido común. Confío en que el desarrollo de tales modos nos mantendrá, a mí y a otros, fascinados durante largo tiempo.

Fluidos magnéticos

Cuando pequeñas partículas ferromagnéticas están en suspensión en un líquido, el "ferrofluido" resultante presenta unas propiedades únicas y muy aprovechables desde el punto de vista práctico

Ronald E. Rosensweig

Imaginemos un líquido con las propiedades de un material ferromagnético; al igual que una barra de hierro ordinario se magnetizaría espontáneamente en presencia de un campo magnético externo. Pero actuaría también como un líquido, capaz de tomar la forma del recipiente que lo contiene y de deslizarse por una pendiente o alrededor de obstáculos. La interacción entre el campo magnético y las propiedades del fluido puede dar lugar a fenómenos bastante sorprendentes. Un sólido ferromagnético, la aguja de una brújula, por ejemplo, puede girar o cambiar su orientación en presencia de un campo externo. En un "ferrofluido", el campo externo podría actuar sobre cada volumen microscópico de líquido de una forma casi independiente, provocando una respuesta mucho más compleja que el movimiento del sólido rígido. Un resultado de esperar es, en respuesta al campo aplicado, que el ferrofluido alteraría no sólo su posición y orientación, sino también su forma. Un campo en cambio continuo podría originar incluso un flujo de líquido magnético. Habría que revisar por entero la teoría de la hidrodinámica, a la vista de las notables modificaciones que en las propiedades de éstos fluidos produce un campo magnético.

El ferromagnetismo es una propiedad del hierro, níquel, cobalto y algunos compuestos y aleaciones de estos materiales. A más de uno se le ocurrirá, para crear un ferrofluido, calentar un metal hasta fundirlo; pero este procedimiento no es válido. ¿Por qué? El comportamiento ferromagnético desaparece por encima de cierta temperatura, denominada punto de Curie, que está, invariablemente, muy por debajo del punto de fusión del material. Lo que sí cabe es crear un fluido magnético estable: formar un coloide donde diminutas partículas ferromagnéticas están en suspensión en un líquido que llamaremos líquido portador.

En los últimos 15 años se han desarrollado métodos para preparar coloides ferrofluidos, cuyas propiedades físicas se han estudiado con bastante detalle. Ya se han introducido algunas aplicaciones tecnológicas de los ferrofluidos y hay muchas otras en perspectiva. Un ferrofluido sirve para enfriar la bobina del cono de un altavoz o para hacer hermética una máquina rotatoria. Los ferrofluidos constituyen la base de nuevas e ingeniosas técnicas para separación de materiales en razón de su densidad. Cabe también desarrollar una bomba de calor cuya operación dependería de las propiedades magnéticas del fluido empleado.

La idea de crear un fluido coloidal con propiedades magnéticas fue objeto de investigación, independiente y casi simultánea, por parte de varios científicos. Uno de los primeros métodos y de más fácil preparación de coloides fue desarrollado por Stephen Papell, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), al comienzo de la década de 1960. El fluido de Papell consistía en partículas de magnetita (una mezcla molecular de los óxidos de hierro FeO y Fe_2O_3) finamente divididas y suspendidas en queroseno. Para evitar que las partículas se depositaran o formasen grandes núcleos, Papell añadió ácido oleico, una sustancia orgánica que actúa de agente dispersante.

Desde 1940 se había empleado partículas magnéticas normales en suspensión para embragues magnéticos; sin embargo, el coloide de Papell se asemejaba muy superficialmente a este tipo de suspensiones. La característica más importante que lo distinguía era el tamaño de las partículas. Bajo la influencia de un campo magnético, un fluido de embrague se congelaba o transformaba en una masa sólida; así pues, cuando se activaba magnéticamente no era un fluido, y viceversa. Las partículas en un ferrofluido son 1000 veces más pequeñas en dimensión lineal (mil millones de veces más pequeñas en volumen), con el resultado de que un ferrofluido no se congela cuando está en presencia de un campo magnético. El ferrofluido se magnetiza y permanece líquido.

Por esos años empezaba yo mis propios estudios sobre fluidos magnéticos en la Avco Corporation; allí, dentro de un programa sistemático, formulamos con éxito fluidos magnéticos que eran 10 veces más fuertes magnéticamente que el ferrofluido original de Papell. En colaboración con Robert Kaiser, mi equipo logró una flexibilidad considerable en la selección de partículas magnéticas, líquido portador y agente dispersante. Al mismo tiempo, desentrañamos los principios físicos responsables de las propiedades de los fluidos magnéticos.

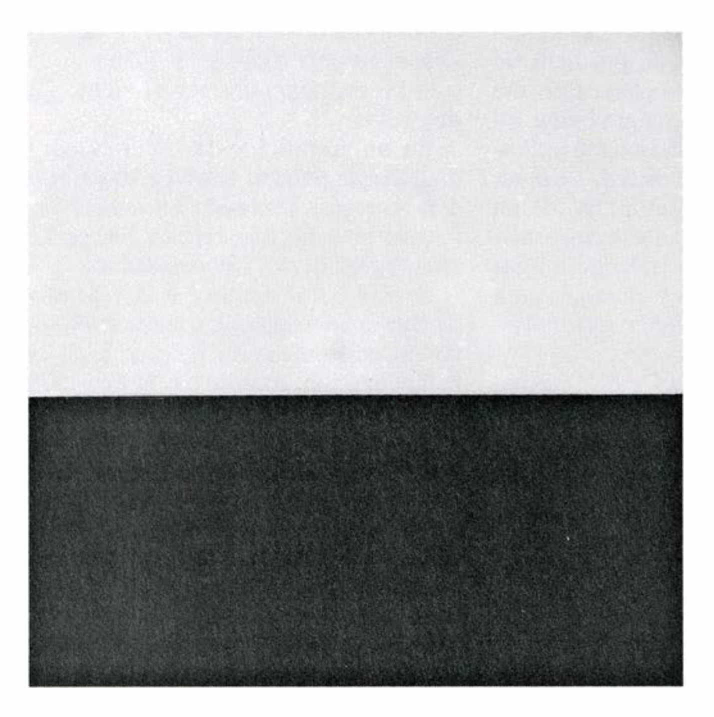
Cuando se aplica un campo magnético a un ferrofluido, se desarrollan fuerzas internas en el líquido. Se llama fuerza interna a la que experimenta un volumen dado de fluido (aunque la magnitud y dirección de la fuerza no sean necesariamente las mismas en todas partes). Para observar los efectos de fuerzas magnéticas internas, basta con dejar correr libremente un ferrofluido entre los polos de un imán con forma de herradura. El campo generado por el imán, que actúa sobre todas las partículas del volumen de fluido que está próximo en cada instante a los polos del imán, desvía la corriente de fluido de su trayectoria vertical.

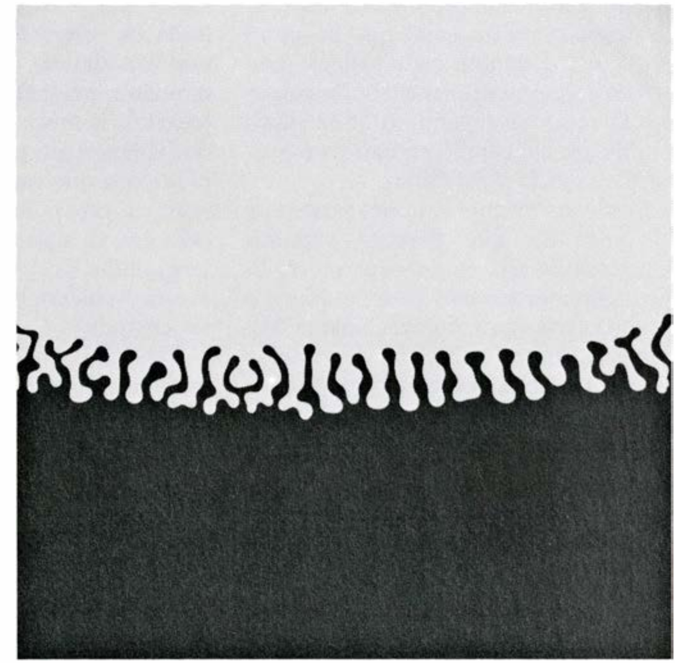
Se nos ofrece una demostración más clara de las fuerzas magnéticas internas si colocamos verticalmente una barra metálica en un depósito plano de ferrofluido. Al aplicar un campo magnético, haciendo pasar una corriente eléctrica estacionaria por la barra, el fluido salta y rodea la barra, formando un menisco cóncavo simétrico, ancho en la base y con tendencia a estrecharse en la parte

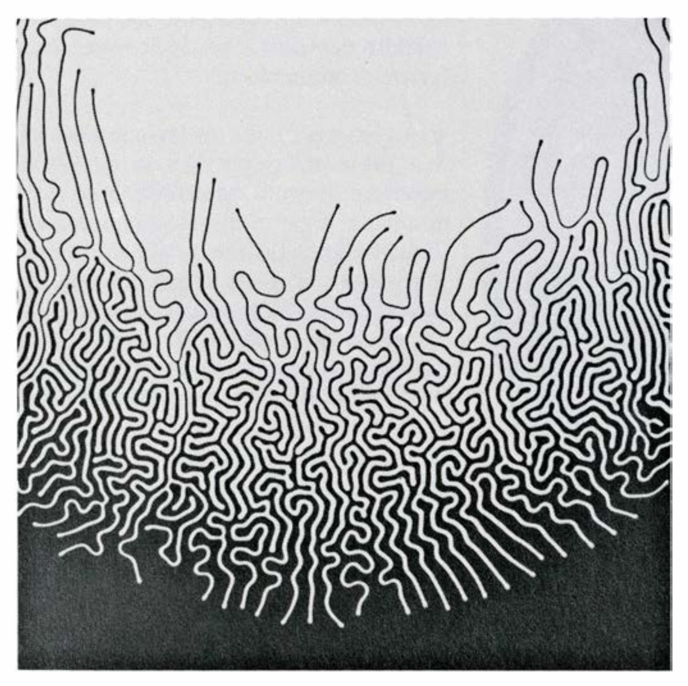
superior. La altura del menisco reproduce exactamente el decrecimiento de la intensidad de campo magnético con la distancia de la barra.

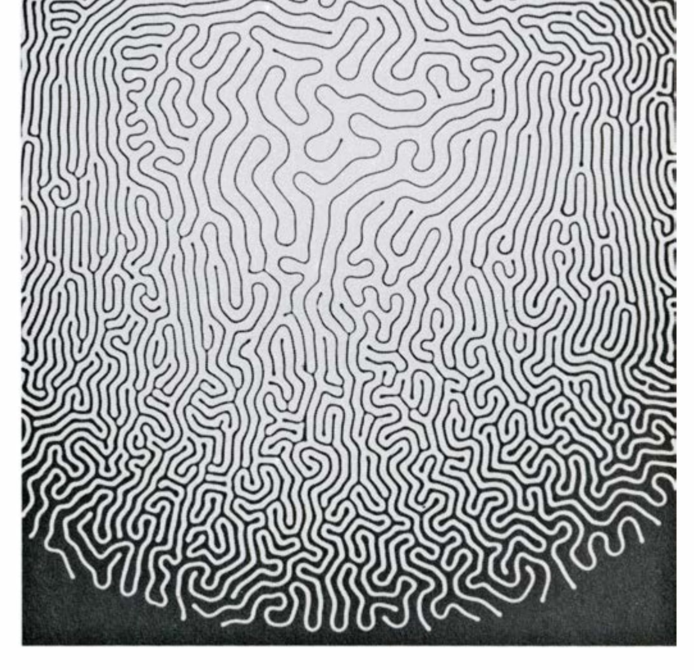
En hidrodinámica, la única fuerza interna que actúa, desde el exterior, sobre el volumen total de un fluido es la fuerza de gravedad. En magnetohidrodinámica, un gas ionizado o un metal líquido que transporta una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético está sometido a otra fuerza interna, denominada fuerza de Lorentz, que representa la interacción de la corriente con el campo magnético. En electrohidrodinámica, iones u otras partículas que lleven carga eléctrica se hallan sujetos a fuerzas electrodinámicas en presencia de un campo eléctrico. En el caso de un ferrofluido no hay corrientes eléctricas o cargas eléctricas. Las fuerzas internas nacen de la interacción de un campo magnético con el momento dipolar ferromagnético característico de cada partícula coloidal.

Un campo magnético se describe matemáticamente como un vector que tiene una dirección y una magnitud en cada punto del espacio. El momento dipolar ferromagnético de un ferrofluido es también vectorial. Su magnitud indica la intensidad de magnetización y su









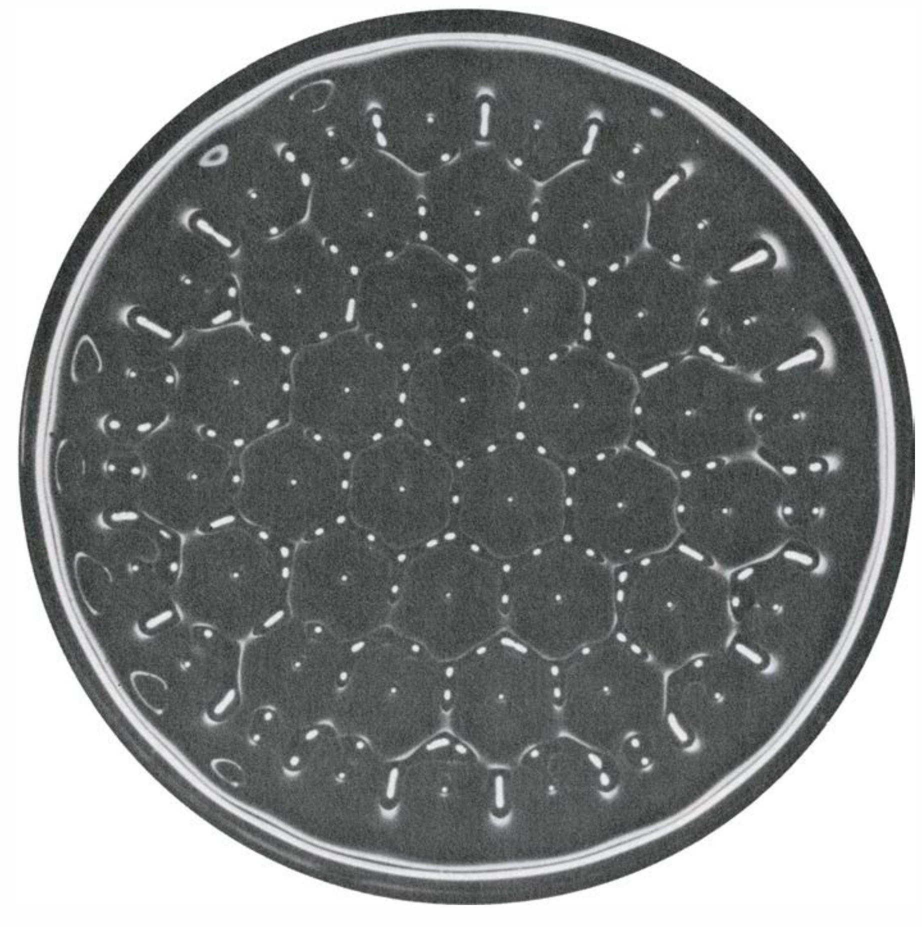
ESTRUCTURA LABERINTICA que se desarrolla rápidamente cuando un líquido magnético (*en color oscuro*) y un líquido no magnético (*en color claro*), inmiscibles, están sometidos a un campo magnético uniforme horizontal. El ferrofluido está formado por pequeñas partículas de magnetita (óxido de hierro) suspendidas en queroseno. Los dos líquidos se encuentran en un recipiente de cristal de 75 milímetros de lado con una separación entre paredes de un milímetro. La densidad del líquido transparente no magnético es un 18 por ciento menor que la del ferrofluido opaco. En ausencia de campo magnético, el líquido magnético más denso permanecerá indefinidamente en el fondo del recipiente. Pero si se aplica un campo magnético, las ramificaciones se extienden debido a pequeñas perturbaciones. Las primeras tres fotografías, sacadas por Ronald E. Rosenweig, están tomadas de una secuencia de 36 en los nueve segundos inmediatos a la aplicación del campo magnético; la cuarta fotografía se hizo transcurridos 90 segundos, una vez alcanzado el equilibrio. La estructura laberintiforme resultante se asemeja a la distribución de dominios magnéticos que se observa en los dispositivos de memoria magnética de burbuja.

dirección está determinada por la orientación de una línea imaginaria que va del polo sur al polo norte, a través de cualquier pequeña región de ferrofluido. Si se aplica un campo magnético uniforme, la fuerza que actúa sobre el polo norte lleva la dirección del campo local en la posición del polo, mientras que la fuerza que actúa sobre el polo sur tiene la misma magnitud aunque sentido contrario. Cada muestra de fluido, como cualquier otro cuerpo magnetizado, siempre posee un número de polos norte igual que de polos sur. Como el campo suele variar ligeramente de un punto a otro, la fuerza sobre la muestra dependerá de la razón de cambio del campo en uno y otro aspecto: sentido y magnitud.

Existe un cálculo especial propio de los vectores, que permite expresar exactamente este complicado efecto físico. En coordenadas rectangulares, o sistema cartesiano, la ecuación que describe la fuerza sobre un ferrofluido consta de nueve términos. Introduciendo algunas suposiciones razonables sobre la naturaleza misma del ferrofluido, se puede simplificar la descripción. Supondremos que una partícula dipolar magnética del fluido se alinea por sí misma paralelamente con el campo local magnético, como si fuera la aguja de una brújula, y supondremos también que no hay corrientes eléctricas que puedan alterar el campo. Estas suposiciones reducen la ecuación de nueve términos para las fuerzas internas en una única relación. La fuerza que actúa sobre una partícula magnética del coloide es proporcional al producto de dos cantidades: el valor absoluto del momento magnético y el gradiente espacial de la magnitud del campo aplicado (el gradiente es una medida de la rapidez con que cambia el campo de un punto a otro). Semejante transformación nos va a permitir trabajar con las magnitudes del campo y eliminar, para mayor facilidad, el carácter vectorial de los campos.

Una de las relaciones más útiles en mecánica de fluidos es la ecuación del matemático suizo Daniel Bernoulli presentada en su obra *Hydrodynamica* en el año 1738. Esta ecuación relaciona la presión, velocidad y la elevación de un fluido que opera en un campo gravitatorio. Bernoulli mostró que, cuando las tres formas de energía inherentes en un flujo –presión, energía cinética y energía gravitatoria– se suman, la adición permanece constante si los efectos de fricción son despreciables. Con la ecuación de Bernoulli se pueden calcular cantidades tales como la variación de presión con la profundidad en un depósito, el empuje sobre el ala de un avión o la fuerza generada por el viento en una vela.

En un ferrofluido las interacciones magnéticas pueden también contribuir a la energía. Teniendo en cuenta las fuerzas internas magnéticas, Joseph L. Neuringer, de la Universidad de Lowell, y el autor ampliaron la ecuación de Bernoulli y llegaron a la ecuación ferrohidrodinámica. La influencia de la magnetización aparece en la ecuación como un término negativo de energía magnética sumado a los otros tres términos ordinarios de Bernoulli. El término magnético es igual al producto de la magnitud del campo magnético aplicado multiplicada por el momento magnético medio del fluido en el volumen sobre el que actúa el campo. Determinar el momento magnético medio requiere conocer cómo se modifica el momento para variaciones en la intensidad del campo aplicado. La ecuación permite describir y predecir los efectos ferrohidrodinámicos.



SE PRESENTA UNA INESTABILIDAD ALTAMENTE SIMETRICA cuando un campo magnético uniforme se orienta perpendicularmente a la superficie horizontal de un ferrofluido. Para que esto ocurra, el fluido magnético debe tener una alta capacidad de magnetización, lo que significa que poseerá al menos 0,25 miligramos por mililitro de magnetita finamente dividida. Los puntos y las barras que aparecen destacadas en color blanco son superficies planas por encima o por debajo del nivel del líquido. La simetría hexagonal del dibujo, que no depende de la forma del recipiente que encierra el líquido, no ha recibido todavía una explicación satisfactoria, aunque puede predecirse el espaciado de las celdas.

Las interacciones de las energías representadas por los distintos términos en la ecuación ordinaria de Bernoulli da lugar a clases diferentes de flujos básicos. La interacción entre presión y energía cinética, que depende de la velocidad, determina el empuje sobre el ala de un avión. La presión y la gravedad interaccionan en un manómetro o en un barómetro. La energía cinética y la gravedad especifican la altura alcanzada por un chorro de agua que sale en una fuente. El término magnético asociado con otros términos de la ecuación de Bernoulli debe dar lugar a nuevas clases de flujos propios de fluidos magnéticos. Este es precisamente el caso, con el resultado de que el número de clases de flujos básicos se incrementa de tres a seis. Además de las interacciones entre presión y velocidad, presión y gravedad y velocidad y gravedad, tenemos interacciones entre magnetización y presión, magnetización y gravedad y magnetización y velocidad.

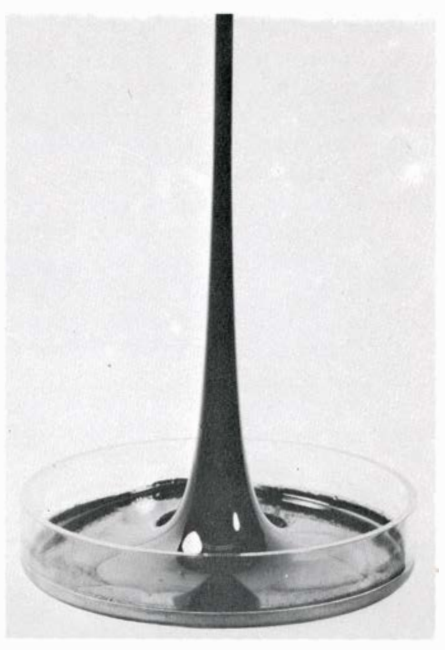
Consideremos primero la interacción

entre magnetización y gravedad. El experimento descrito antes, donde un ferrofluido subía por una barra vertical por la que circulaba una corriente, sirve de ejemplo para este tipo de flujo. Podemos entender la interacción si calculamos el término de energía magnética en la ecuación ampliada de Bernoulli. Las líneas de campo magnético creadas por la corriente en la barra son círculos concéntricos; la intensidad del campo, o dicho de otro modo, la densidad de líneas, varía inversamente con la distancia desde el centro de la barra. Puesto que el líquido es atraído hacia regiones de alta intensidad de campo, es necesario realizar un trabajo sobre una porción de ferrofluido para alejarla de la barra. El trabajo total que se realizaría para mover una porción de fluido desde una posición con un radio finito a un punto muy distante constituiría la energía magnética de esa porción de fluido. Observemos que el fluido lejos de la barra ha de tener una energía magnética mayor que cerca de la barra, aun cuando cerca de la barra la intensidad de campo fuera superior. A la energía magnética lejos de la barra se le asigna, de forma arbitraria, el valor cero; por tanto, la energía magnética en cualquier otra posición cerca de la barra será negativa.

Consideremos ahora la energía gravitatoria de las distintas porciones de fluido. A medida que una porción de fluido se eleva a una posición más alta, a lo largo de la barra, aumenta su energía gravitatoria. En el menisco, la presión es constante en cualquier punto y, la velocidad, nula. Bajo estas condiciones, de acuerdo con la ecuación ampliada de Bernoulli la suma de la energía gravitatoria y la energía magnética debe permanecer constante. Las porciones de fluido más próximas a la barra tienen la mínima energía magnética y, por tanto, la máxima energía gravitatoria, posibilitando que alcancen mayor altura en la barra.

La interacción entre magnetismo y presión da lugar a consecuencias de no menor interés. Por ejemplo, se puede formar a modo de un coágulo de ferrofluido para taponar totalmente un tubo que comunique dos vasijas que contengan gases a distintas presiones. En un fluido normal, el coágulo se desplazaría hasta que se igualasen ambas presiones. En un ferrofluido, sin embargo, el coágulo puede mantenerse en una posición establecida merced a un campo magnético externo focalizado en esa posición. Cuando las presiones de las vasijas son iguales, el coágulo permanece en la mitad del campo. Si se aumenta la presión de una de ellas, el coágulo recorre una distancia muy corta hacia la región de más baja presión antes de que las fuerzas magnéticas lo mantengan quieto.





EQUILIBRIO ENTRE FUERZAS MAGNETICAS Y GRAVITATORIAS, puesto en evidencia al hacer pasar una corriente eléctrica a lo largo de una barra de metal colocada verticalmente en un recipiente plano de ferrofluido. La fotografía de la izquierda muestra el dispositivo experimental sin corriente alguna. Cuando circula la corriente, el fluido salta hacia arriba, según se aprecia en la foto de la derecha. En cada punto del ferrofluido, la suma de las energías magnética, de presión y gravitatoria es constante.

La relación de Bernoulli para la ferrohidrodinámica también explica el mecanismo de ese fenómeno. El análisis resulta más simple cuando se trata de un sistema horizontal (la energía gravitatoria es constante) y en reposo (la energía cinética es nula). La suma del término de energía debido a la presión y el término de energía magnética es constante en cualquier punto del coágulo de ferrofluido. Habida cuenta de que un desequilibrio de presión desplazará el coágulo, el fluido en el lado de más baja presión se verá empujado hacia la región de campo magnético débil, incrementando la energía magnética del fluido. Al mismo tiempo, el fluido empujado hacia la región de campo magnético intenso perderá energía magnética. Los dos cambios se combinarán y originarán una diferencia de presión en el ferrofluido que frena el desplazamiento del coágulo.

Para cerrar herméticamente un tubo ordinario no suele recurrirse a ningún líquido; se utiliza una válvula o un tapón sólido. Pero la situación es otra cuando ha de pasar un eje giratorio por entre compartimentos estancos. Los ejes giratorios sellados herméticamente constituyen la primera aplicación comercial de los ferrofluidos. Un sello de una sola etapa y optimizado puede soportar diferencias de presión de una atmósfera.

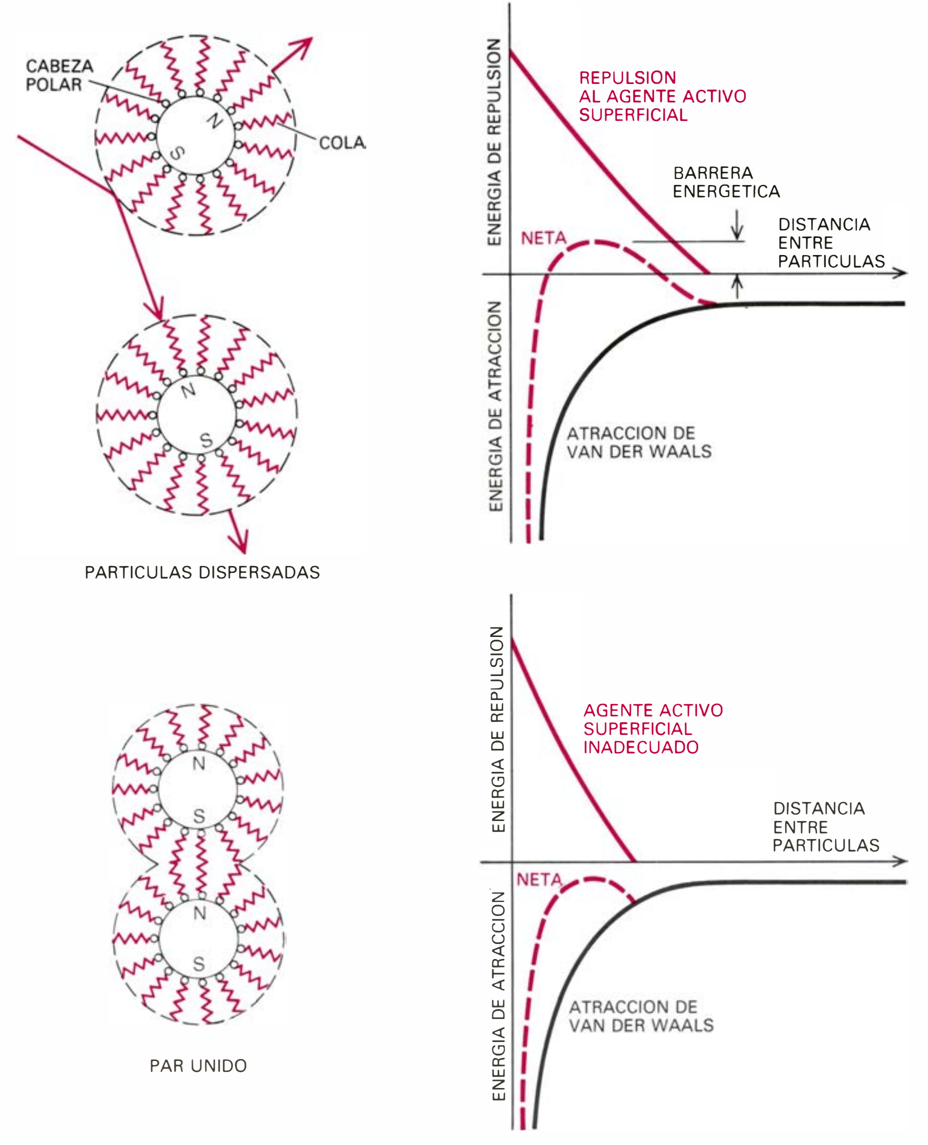
Cuando una gota de ferrofluido se somete a un campo magnético uniforme se nos presenta un fenómeno inesperado: la gota se alarga en la dirección del campo. Aunque este efecto es congruente con la ecuación ampliada de Bernoulli, no lo predice. La ecuación establece solamente que la energía magnética es constante para un campo magnético uniforme dentro de la gota. El alargamiento se debe a variaciones de esfuerzos magnéticos en la superficie de la gota. El fenómeno admite una explicación matemática a través del cálculo de las diferencias en esfuerzos magnéticos en la superficie de la gota con la ayuda del llamado tensor de esfuerzos magnético. El cálculo da lugar a una condición de contorno, que debe ser satisfecha junto con la ecuación de Bernoulli, siempre que el ferrofluido presente una superficie libre.

Analicemos ahora con más detalle la naturaleza de un fluido magnético coloidal. La teoría cinética sugiere que una partícula material fina puede mantenerse indefinidamente en suspensión en un líquido, aunque la densidad de la partícula sea mucho mayor que la del líquido. La partícula colisiona continuamente con moléculas del líquido en movimiento aleatorio térmico, lo que permite que ésta no se sedimente. Las moléculas comparten su energía cinética con la partícula en suspensión. La

energía de las partículas en movimiento viene dada en unidades de la constante de Boltzmann k, que tiene un valor numérico de $1{,}38 \times 10^{-16}$ erg por grado Kelvin por partícula. La energía de una partícula individual es kT, donde T es la temperatura en grados Kelvin. Para que una partícula permanezca en suspensión indefinidamente, esta energía térmica debe ser igual o mayor que la energía gravitatoria necesaria para elevar la partícula a la altura del recipiente que contiene el fluido.

Cuando se hace el cálculo para una partícula magnética con una densidad de 5,2 gramos por centímetro cúbico en suspensión en una botella con un aceite ordinario y una altura de 10 centímetros, se obtiene que la partícula no puede ser mayor de 100 angstrom, o una millonésima de centímetro. Esta es la mayor partícula que se mantendrá en suspensión prácticamente durante el mismo tiempo en todas las regiones del fluido.

Cuando hay muchas partículas en un mismo volumen de fluido, puede presentarse otra situación distinta. Si dos o más partículas colisionan, se pueden juntar, formando entonces una partícula más pesada. La razón de la energía térmica a la energía gravitatoria disminuye, lo que puede determinar que la partícula se sedimente.



LA ESTABILIDAD DE UN FERROFLUIDO depende de que las partículas magnéticas sean muy pequeñas y se evite un amontonamiento. Las partículas miden unos 100 angstrom de diámetro; el movimiento aleatorio térmico de moléculas en el líquido evita que se sedimenten. Las partículas no se amontonan si se cubren con una sustancia denominada agente activo superficial, con un espesor de una molécula. Aunque cada partícula se parece a un pequeño imán, la atracción magnética es despreciable para partículas muy pequeñas. La fuerza de van der Waals es la mayor fuerza de atracción; aparece entre partículas que tienen cargas eléctricas fluctuantes que no están uniformemente distribuidas. Debido a que la fuerza de van der Waals decrece rápidamente con la distancia, puede eliminarse rodeando cada partícula con un agente activo superficial molecular en forma de cadena, que actúa de amortiguador. Cada molécula del agente activo, piénsese en el ácido oleico, tiene una "cabeza" polar, que puede ser adsorbida en la superficie de la partícula, y una "cola", con una afinidad por el líquido que la rodea (*arriba a la izquierda*). El efecto de amortiguamiento provoca una fuerza de repulsión y, por tanto, levanta una barrera energética que puede mantener las partículas separadas si la velocidad con que se aproximan no es muy grande (*curvas en la parte superior derecha*). En el caso en que las moléculas amortiguadoras son muy cortas o carecen de configuración adecuada, las partículas pueden amontonarse (*diagrama y curvas inferiores*).

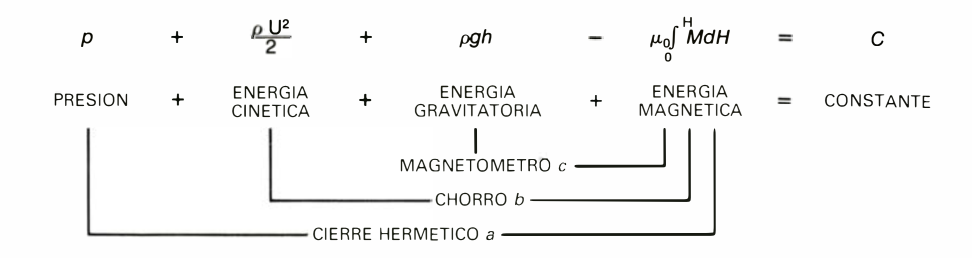
Dos fuerzas atraen recíprocamente las partículas de un ferrofluido: la fuerza magnética y la fuerza de van der Waals. Las fuerzas magnéticas están siempre presentes, incluso cuando el fluido no ha sido magnetizado por un campo externo. Bajo estas condiciones, en un sólido no se observa magnetización. La razón estriba en que el sólido está formado por muchos momentos magnéticos individuales, cuyos vectores están orientados al azar y, por tanto, se anulan. El tamaño de un dominio es del orden de un micrometro, unas 100 veces el tamaño de una partícula de 100 angstrom. Cada partícula del ferrofluido constituye un dominio, o subdominio, y está magnetizada de forma inherente hasta la saturación. Aunque la magnetización espontánea de las partículas del ferrofluido da lugar a fuerzas de atracción entre ellas, no produce aglomeraciones. Por ser las partículas muy pequeñas, la fuerza magnética es muy débil en un líquido bien preparado. Las fuerzas de van der Waals sí adquieren un papel destacado y deben estudiarse en detalle.

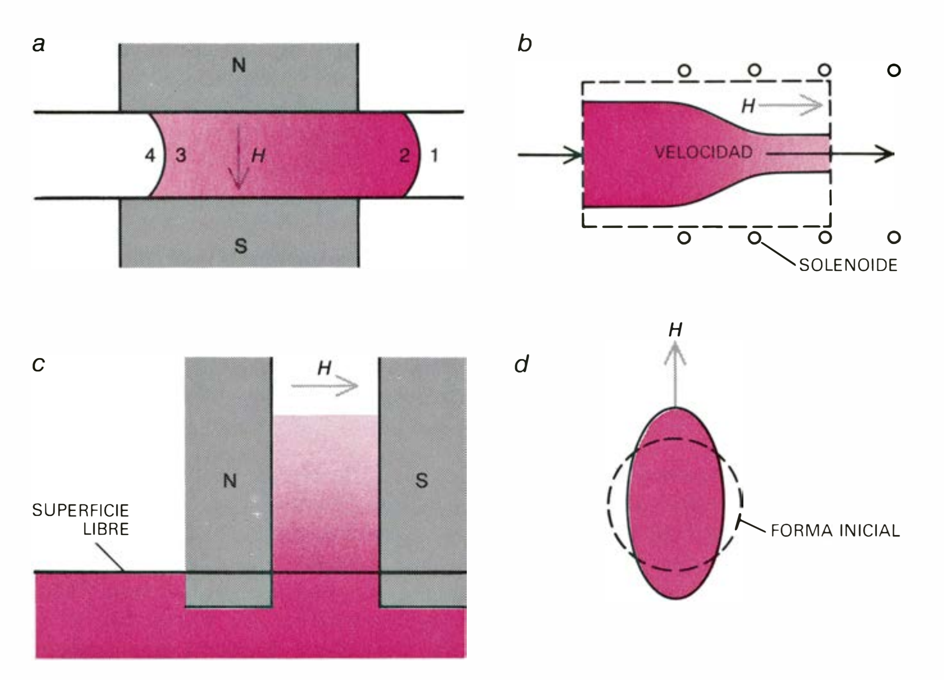
El origen de las fuerzas de van der Waals reside en la estructura electrónica de los átomos y moléculas. Una molécula con un momento dipolar eléctrico (esto es, un exceso de electrones en una región y una falta de ellos en otra) puede inducir una distribución similar de carga en las moléculas próximas. La fuerza de van der Waals es la atracción que aparece entre dipolos, que, a su vez, son creados por fluctuaciones en la estructura electrónica. De acuerdo con el modelo desarrollado por Fritz London, la energía necesaria para vencer la fuerza de van der Waals entre dos partículas es inversamente proporcional a la separación de sus centros elevada a la sexta potencia. Para esferas de igual tamaño, la energía de van der Waals es igual a la energía térmica kT cuando las esferas están separadas una distancia de cerca de un radio de una de las esferas, independientemente del tamaño de las esferas. A medida que las esferas se aproximan, la energía necesaria para vencer la atracción de van der Waals aumenta rápidamente. Para evitar aglomerciones en un coloide, las partículas deben mantenerse bien separadas.

Se puede conseguir la separación necesaria entre partículas preparando un fluido elástico que cubra cada partícula con una película molecular que actúe

de colchón elástico. Las propias partículas pueden obtenerse de dos formas: reduciendo el tamaño de partículas grandes o precipitando en una solución las partículas del tamaño deseado. El triturado de partículas constituye el método más idóneo para reducir el tamaño de partículas grandes. Pero se prefiere la precipitación cuando se trata de producirlas a gran escala. Cualquiera que sea el procedimiento a seguir, el recubrimiento con un agente activo superficial para asegurar la separación adecuada de las partículas se hace al mismo tiempo que se consiguen éstas, o se añade inmediatamente después.

Las moléculas de este agente activo poseen un grupo molecular, o cabeza, que se adhiere a la superficie de la partícula, y una cola de 10 o 20 angstrom, por lo menos, que tiene afinidad con el líquido portador. Las colas están en constante agitación, creando una repulsión que tiende a separar las partículas donde se solapan las colas. El ácido oleico, que estabiliza una suspensión de partículas de magnetita en queroseno como líquido portador, es una molécula orgánica cuya cola es una cadena de 18 átomos de carbono y cuya cabeza es un grupo carboxil polar (COOH). Un requisito estructural de manifiesta importancia para un agente activo superficial es que la cola tenga una protuberancia o un pliegue, a fin de evitar que las moléculas se agrupen y formen cristales. En el ácido oleico, el pliegue débese a un doble enlace en la mitad de la cadena de los 18 carbonos. El ácido esteárico, que se diferencia del ácido oleico en la ausencia de este enlace, no sirve de agente activo.





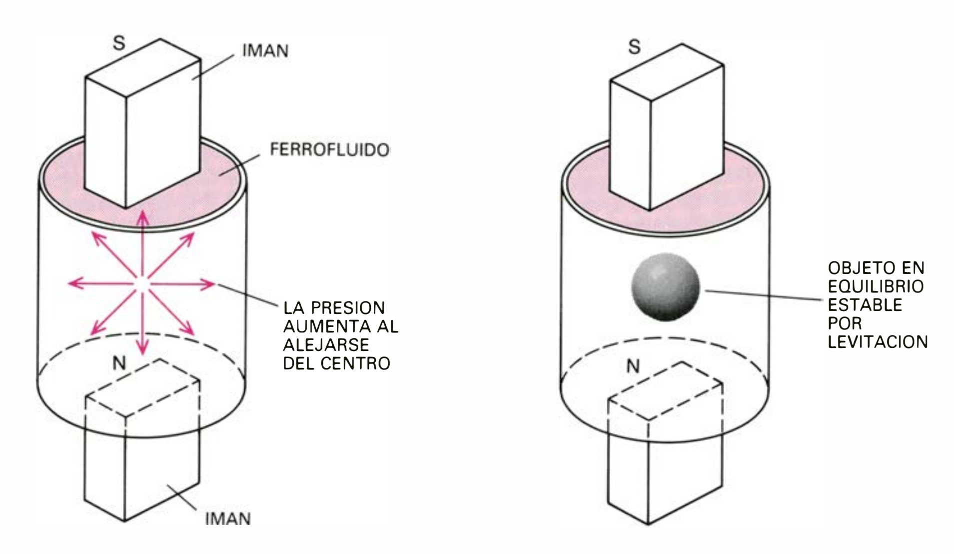
ASI SE COMPORTA UN FERROFLUIDO sometido a presiones, movimiento y gravedad en presencia de un campo magnético. Se entiende si extendemos la ecuación de Daniel Bernoulli de suerte que incluya el magnetismo como la cuarta fuerza. Bernoulli demostró que, en un líquido ordinario (prescindiendo de la fuerza de fricción), la suma de las energías asociadas con presión, movimiento y gravedad es constante. Para un ferrofluido, la energía magnética se debe introducir como un término negativo en la ecuación, y es la suma de las cuatro cantidades la que permanece constante (*arriba*). Regiones del ferrofluido con mayor energía magnética se muestran en color oscuro. La ecuación ampliada predice que una sección de ferrofluido en un campo magnético (*a*) responde a un cambio de presión si se mantienen constantes las energías cinética y gravitatoria. Cuando la presión en la región 4 es mayor que en la región 1, la sección de ferrofluido es empujada hacia la derecha hasta que la presión en la región 3 se iguala a la de la región 4, con la correspondiente pérdida de energía magnética; la presión en la región 2 disminuye hasta que iguala la presión de la región 1, con el correspondiente incremento en energía magnética. El acoplamiento entre energías cinética y magnética se puede observar en un ferrofluido que discurre horizontal y libremente (*b*). El trabajo realizado sobre el fluido por el campo magnético reduce la sección transversal de la corriente y el contenido de energía magnética del fluido, mientras que aumenta su velocidad. No hay cambio en la presión interna del fluido o en su energía gravitatoria. El acoplamiento entre energías gravitatoria y magnética forma un magnetómetro (*c*). Un cambio en la intensidad del campo generado por un imán modifica la altura del ferrofluido entre los polos del imán. Cuando una gota de ferrofluido se somete a un campo externo uniforme, la gota se alarga debido a esfuerzos superficiales desiguales (*d*), un efecto que, aunque no lo predice la ecuación ampliada de Bernoulli, se muestra coherente con ella.

Los polímeros que tienen varios grupos con gran afinidad para las partículas magnéticas son los estabilizadores más tenaces. Si un grupo o cabeza se desprende de la partícula, hay gran posibilidad de que otros grupos se mantengan unidos y aseguren la integridad de la película elástica. En dependencia de la elección del medio para la suspensión y del agente activo, las densidades de los ferrofluidos variarán entre la densidad del agua y el doble de ese valor.

Conocemos, de un modo aproximado, las relaciones energéticas que determinan las propiedades de un coloide. La película elástica que encierra una partícula crea una fuerza repulsiva si la distancia entre las superficies de dos partículas adyacentes es algo menor que dos veces el espesor de una de esas películas repulsivas. Las partículas se pueden aproximar distancias menores que ésta, si su energía térmica es lo suficientemente grande para vencer la repulsión entre dichas películas superficiales. A temperatura ordinaria, la película superficial de agente activo asegura la estabilidad a largo plazo del coloide.

Una de las propiedades más importantes de un ferrofluido estable es su respuesta cuando se le aplica un campo magnético. Indiqué antes que las partículas magnéticas en ferrofluido son más pequeñas que un dominio magnético y que, por tanto, están saturadas espontáneamente en su totalidad. Sin embargo, cuando se aplica un campo magnético de baja o moderada intensidad a un ferrofluido, no se alinean todas las partículas con el campo aplicado. El campo debe aumentarse considerablemente para que se alcance la saturación completa, es decir, la alineación de todas las partículas.

Obedece ello a que la agitación térmica tiende a desorientar los momentos. Hay dos posibles mecanismos responsables de este efecto: o bien el momento magnético está ligado a la estructura cristalina y la partícula gira con el momento, o la dirección del momento magnético gira con respecto a la estructura cristalina. La diferencia entre un mecanismo y otro carece de relevancia práctica, ya que su descripción estadística es la misma. La respuesta de las partículas a la aplicación de un campo equivale al fenómeno paramagnético



LEVITACION DE UN OBJETO NO MAGNETICO, un efecto descubierto por el autor. Nos hallamos ante otra demostración de la ecuación ampliada de Daniel Bernoulli. Cuando se coloca un recipiente lleno con un ferrofluido entre los polos de dos imanes de igual intensidad (*izquierda*), la energía magnética es superior en el centro del fluido y disminuye simétricamente hacia afuera. Puesto que la suma de la energía magnética y la presión ha de mantenerse constante en todo punto, la presión es más baja en el centro y aumenta con la distancia desde el mismo. Cuando un objeto no magnético, así una bola de cristal, se introduce en el recipiente (*a la derecha*), se mueve hacia el centro permaneciendo allí en equilibrio.

observado en la polarización de moléculas dotadas de un momento dipolar. Puesto que una partícula de un ferrofluido es mucho mayor que una sola molécula, el momento por partícula es también mucho mayor; la respuesta recibe el nombre de superparamagnetismo. Una forma similar de magnetismo caracteriza las partículas utilizadas en las cintas de grabación, en especímenes de rocas y agentes catalizadores ferromagnéticos finamente divididos.

Una de las propiedades macroscópicas de los ferrofluidos que yo creo fui el primero en observar es cierta clase, inesperada, de levitación. Si se colocara una esfera no magnética, un vidrio por ejemplo, en un recipiente cerrado que contuviera un ferrofluido cuya gravedad específica fuera menor que la de la esfera, cabría esperar que la esfera se hundiera hasta el fondo; eso es lo que precisamente ocurre. Si se coloca el recipiente entre los polos de dos imanes de igual intensidad, uno directamente encima del ferrofluido y el otro por debajo, la esfera sube desde el fondo del recipiente avanzando hacia el centro del fluido. La esfera permanece allí flotando por tanto tiempo cuanto se mantenga el campo magnético.

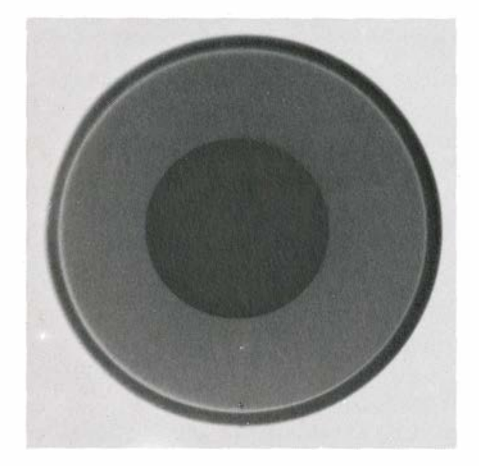
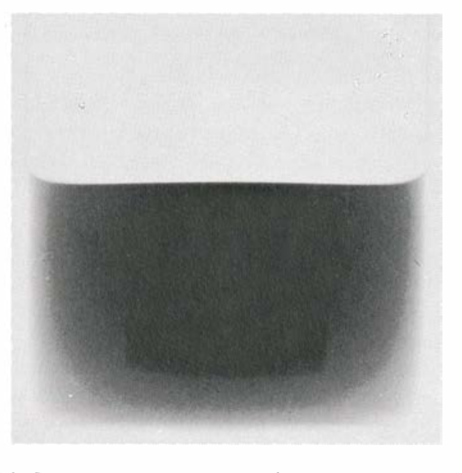
¿Cómo explicar este hecho? Puesto que los polos opuestos son de igual intensidad, el campo en el centro del fluido debe ser cero y crecer simétricamente hacia fuera. Pero ya lo dije más arriba: la energía magnética del fluido es inversamente proporcional a la intensidad de campo, lo que significa que la energía magnética es mayor en el centro del fluido y disminuye de forma continua con la distancia desde el centro. Según la ecuación ferrohidrodinámica de Bernoulli, la suma de la energía magnética y la presión tiene que mantenerse constante en cualquier parte del fluido, y así la presión será más baja en el centro y se incrementará con la distancia a medida que decrezca la energía magnética. Por consiguiente, la esfera de vidrio experimenta unas fuerzas de presión no uniformes que hacen que se eleve desde el fondo del recipiente hasta el centro del fluido donde alcanza el equilibrio estable.

Hallé posteriormente que la fuente de campo magnético externo puede ser el mismo objeto que experimente levitación. Un ferrofluido levita un imán sólido que sea hasta casi cuatro veces más denso que el fluido. Aplicaciones recientes de ferrofluidos incluyen la separación de diamantes de arenas mediante una flotación selectiva y la guía de barrenas de perforación para petróleo con un acelerómetro subterráneo, en el que la masa sensible experimenta levitación en un ferrofluido.

De varias maneras se torna inestable el flujo de un fluido ordinario. A baja velocidad, por ejemplo, un líquido fluye suavemente por un tubo; mas, a una velocidad crítica, el flujo suave se hace turbulento. Los líquidos magnéticos presentan nuevas inestabilidades que no se han observado en ningún otro líquido.

La inestabilidad más característica de un ferrofluido aparece incluso cuando éste no está en movimiento, con tal de que pueda aceptar suficiente magnetización. Si se aplica un campo magnético perpendicularmente a la superficie de un ferrofluido, a medida que se aumenta la intensidad del campo la superficie plana se deshace de repente formándose una configuración hexagonal de agujas. Mis colegas y yo observamos este fenómeno poco después de conseguir preparar un ferrofluido 10 veces más magnético que los obtenidos originalmente.

M. D. Cowley, de la Universidad de Cambridge, y yo hemos realizado un análisis matemático que predice cómo se forma la inestabilidad y el espaciado de la configuración hexagonal. De acuerdo con nuestros resultados, pequeñas ondas aleatorias que siempre están presentes en la superficie son amplificadas al focalizar el campo magnético y, con ello, el esfuerzo magnético al que ellas mismas están sometidas. Cuando la fuerza magnética excede la fuerza de restauración debida a la tensión superficial, aparecen sobre la superficie numerosas agujas pequeñas.

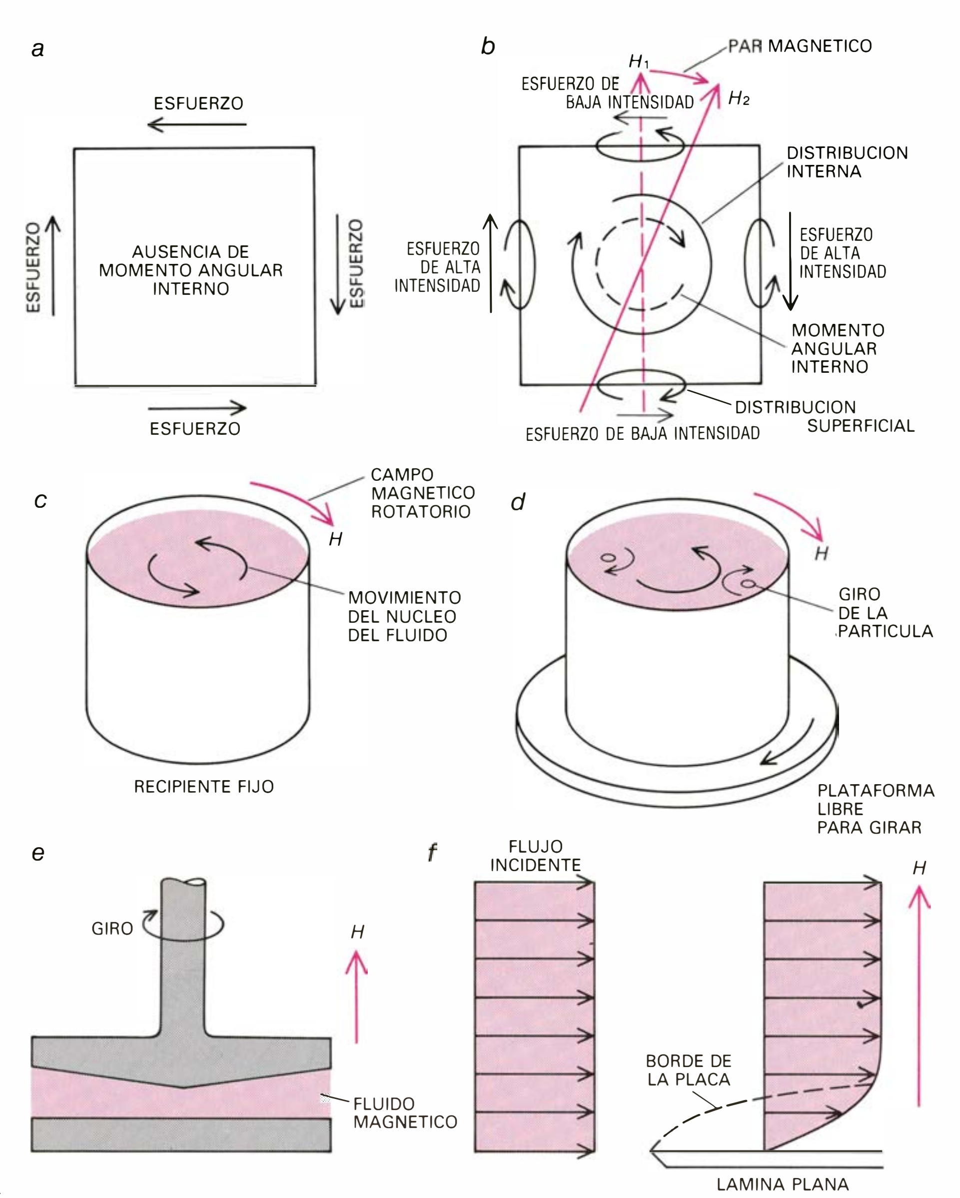



AUTOLEVITACION DE UN OBJETO MAGNETICO. Representa la inversión del fenómeno mostrado en la figura anterior. Las dos imágenes de rayos X revelan un disco magnético suspendido de forma estable en un recipiente lleno de ferrofluido. En la vista lateral, el imán, que viene a ser unas cuatro veces más denso que el fluido, aparece flotando por encima del fondo del recipiente plano. El fenómeno, descubierto por el autor, se ha aplicado comercialmente para instrumentos con anillos de baja fricción.

Los picos que crecen más deprisa contrarrestan o aumentan los picos vecinos, de forma que los picos que quedan tienden a espaciarse uniformemente en la mayor distancia posible. La mejor acomodación se obtiene en un dibujo hexagonal.

Se observa otra inestabilidad cuando un fluido magnético y uno transparente inmisables se colocan en capas alternas entre dos placas de cristal muy próximas. En ausencia de campo externo, la interfase es una línea horizontal con el fluido magnético, más denso, en la parte inferior. Cuando se aplica un campo magnético perpendicular a las placas, la interfase se deforma y adquiere la estructura de un peine, con ramificaciones de ferrofluido empujando hacia arriba, dejando huecos por donde penetra el fluido no magnético. En cuestión de segundos surge un laberinto muy complejo, similar en su forma a las transiciones entre regiones magnéticas y no magnéticas en ciertos superconductores y también a los complicados dibujos de los dominios que aparecen en los granates ferromagnéticos utilizados en los dispositivos de memoria magnética de burbuja. James R. Melcher y sus alumnos han estudiado, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, numerosos sistemas en los que un campo magnético tangencialmente orientado produce el efecto contrario: elimina las inestabilidades que se podrían formar en un ferrofluido.

B. M. Berkovsky y V. G. Bashtovi, del Instituto A. V. Luikov en Minsk, Unión Soviética, han estudiado una inestabilidad del ferrofluido muy interesante. El experimento consiste en colocar un ferrofluido en un líquido de la misma densidad e introducir horizontalmente un alambre por el que circula una corriente. Para una corriente suficientemente alta (y como consecuencia del campo magnético) el ferrofluido es atraído hacia el hilo formando un cilindro alrededor del mismo. A medida que se reduce de nuevo la corriente, el cilindro se rompe en trozos igualmente espaciados como cuentas de un rosario. La inestabilidad está bien estudiada y este fenómeno puede observarse en un chorro de agua saliendo de un grifo: el agua sale como un cilindro bien constituido, el cual va perdiendo su forma hasta desintegrarse. En un ferrofluido la inestabilidad viene controlada por la razón de la energía magnética a la energía de tensión superficial. La habilidad para establecer, controlar e incluso prevenir las distintas inestabilidades por medios magnéticos sugiere un gran número de aplicaciones posibles, objeto hoy de investigación.



APARECEN ESFUERZOS ASIMETRICOS en un ferrofluido cuando se cambia la orientación del campo magnético aplicado. Si se gira de repente un fluido no magnético, una porción en forma de cubo de fluido (*a*) experimentará esfuerzos tangenciales simétricos. Al girar con respecto al campo magnético un ferrofluido (*b*), las partículas magnéticas experimentan un par que establece esfuerzos no compensados. El cambio en la dirección relativa del campo crea una distribución de pares dentro de las pequeñas porciones de fluido. Habida cuenta de que esta distribución varía de un punto de la superficie a otro, puede haber transporte de momento angular a través del fluido. Si en un recipiente plano (*c*) se crea un campo magnético que gire alrededor de él, todo el fluido, en respuesta a esfuerzos antisimétricos, gira en sentido contrario al campo. Si el recipiente se coloca en una mesa que gire libremente (*d*), el fluido y el recipiente rotarán con sentidos opuestos. Si se coloca un ferrofluido entre dos discos, el inferior estacionario y el superior que pueda girar, y se aplica un campo magnético vertical (*e*), la viscosidad del ferrofluido aumentará, dificultando el giro del disco superior. Si se aplica un campo magnético vertical a un ferrofluido que fluye a través de una lámina plana fija (*f*), la velocidad del fluido en el borde de la placa se reducirá no sólo por fricción, sino también por la interacción que se produce entre el fluido y el campo aplicado.

Podemos observar y analizar otra peculiaridad del flujo de un ferrofluido cuando al ferrofluido se le comunica un movimiento de rotación en presencia de un campo magnético. Supongamos que un fluido ordinario y un ferrofluido se colocan en una plataforma giratoria. En el fluido no magnético, el momento angular inducido por rotación varía de un punto a otro; aunque en cualquiera de ellos tiene un único valor, o componente. Para analizarlo se recurre al esfuerzo tangencial –la fuerza que hace que una porción de fluido se deslice sobre otra– en un pequeño volumen cúbico de fluido. Como consecuencia de la ley de conservación del momento, las componentes opuestas del esfuerzo tangencial que actúan sobre el cubo deben ser iguales en las cuatro caras perpendiculares al plano de rotación.

La situación es distinta en el caso en que el fluido que gira es un ferrofluido polarizado por un campo magnético horizontal fijo. Las partículas magnéticas, en rotación al estar en

la plataforma, tratan de permanecer alineadas con el campo, pero debido a la fricción hay siempre un pequeño ángulo entre la orientación de la partícula y la dirección del campo aplicado. Más aún, puesto que cada partícula está girando tratando de mantener su alineación, tiene un momento angular "interno" que es distinto del "externo" del líquido portador que la rodea. Como resultado, las componentes del esfuerzo tangencial sobre el cubo de ferrofluido dejan de ser iguales; el esfuerzo incluye entonces elementos que se describen como antisimétricos. Puesto que las partículas magnetizadas que giran pueden difundirse por el fluido, éstas pueden transportar momento angular a volúmenes de fluido vecinos. La rotación de partículas individuales viene ligada, entonces, al movimiento del fluido como un todo.

Lo que acabo de describir es la respuesta de un ferrofluido girando en un campo magnético fijo. En nuestros primeros experimentos en Avco, mi colega Ronald Moskowitz y yo nos interesamos por saber qué ocurriría si el ferrofluido introducido en un recipiente fijo se sometiera a un campo magnético rotatorio. Es fácil generar un campo magnético rotatorio con una distribución de bobinas como las de un motor de corriente alterna. Observamos que el ferrofluido giraba a medida que las partículas trataban de permanecer orientadas con el campo. En un campo girando a 1000 revoluciones por segundo, el fluido alcanzó las 200 revoluciones por minuto.

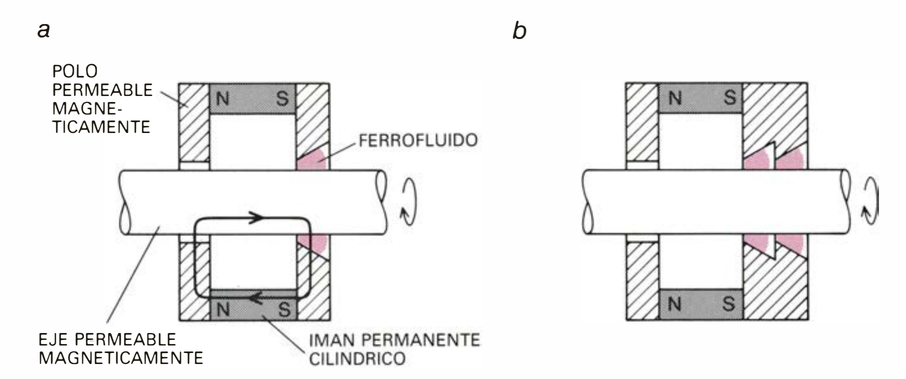
Dos investigadores ingleses, R. Brown, de la Universidad de Sheffield, y T. S. Horsnsell, de la British Steel Corporation, repitieron el experimento con el recipiente apoyado sobre una mesa que podía girar libremente. Se sorprendieron al ver girar el fluido en sentido opuesto al de la mesa y el recipiente juntos. El fenómeno no ha recibido todavía una explicación satisfactoria, si bien está probablemente asociado con las condiciones de contorno inducidas por esfuerzos antisimétricos. En la ecuación hidrodinámica de Bernoulli no entra en consideración la existencia de esfuerzos antisimétricos. En la mayoría de los casos, los efectos de los esfuerzos antisimétricos pueden despreciarse, pero es evidente que tales esfuerzos tienen consecuencias importantes en ciertas situaciones.

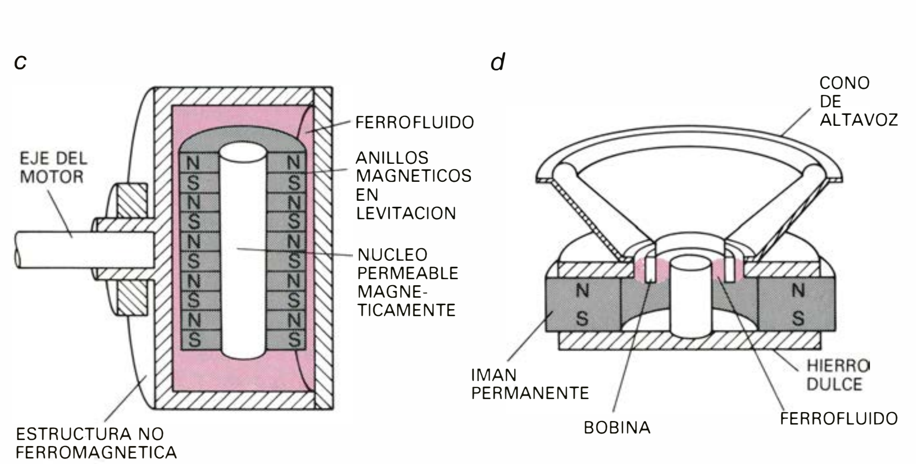
Ferrofluidics Corporation of Nashua, New Hampshire, una compañía que fundé con Moskowitz en 1968, ha sido de las primeras en desarrollar aplicaciones comerciales de fluidos magnéticos. He mencionado ya que la primera aplicación fue la de cerrar herméticamente el hueco que siempre queda entre un eje rotatorio y su estructura. Sólo se necesitan unas gotas de ferrofluido en el hueco entre el eje y un imán permanente cilíndrico, que forma un collar alrededor del eje, para convertirse en un buen sello hermético. El fluido crea un anillo impermeable alrededor del eje, al mismo tiempo que lo deja girar con un rozamiento despreciable. Sellos de este tipo forman una barrera entre la atmósfera y el vacío interno de los hornos para crecimiento de cristales de silicio. También se aplican a láseres de gas, motores y otros muchos dispositivos. En las unidades de memoria de disco de un ordenador, la "cabezas" para lectura y grabación se deslizan a pocas millonésimas de centímetro sobre el disco giratorio. Basta una partícula de polvo que se introduzca entre la cabeza y el disco para estropear la superficie de grabación. Las mismas partículas que suelta el disco por su uso pueden destruir esa superficie. Un sello de ferrofluido elimina tales problemas de contaminación.

Se han diseñado sellos de múltiples capas para tratar problemas de alta presión. Cuando se presuriza un sello, cada capa presuriza las demás. La presión total que puede soportar es la suma de las presiones a través de todas las capas. Un sello para eje rotatorio con 160 capas soporta una presión diferencial de 66 atmósferas.

Para la fabricación de altavoces se ha desarrollado una variante del sello de presión por ferrofluido que demuestra ser muy útil. El elemento de mayor trabajo en casi todos los altavoces es la bobina cilíndrica acoplada al imán cilíndrico, permanente, con un pequeño hueco que permite que la bobina se mueva. El calor desarrollado en la bobina se disipa más rápidamente cuando se sustituye por un líquido el aire del hueco. Cualquier líquido al uso se saldría del hueco, pero el ferrofluido puede mantenerse por el campo magnético existente. Hay posibilidades muy prometedoras de diseño de fuentes acústicas en las que el sonido lo produzcan directamente vibraciones de ferrofluidos excitados magnéticamente.

La levitación magnética en un ferro-





APLICACIONES DE LOS FERROFLUIDOS, en continuo aumento desde 1968. Los primeros dispositivos (*a*) fueron cierres herméticos sin fricción para ejes rotatorios, formándose un anillo de ferrofluido alrededor del eje por un campo magnético de alta intensidad. Los cierres herméticos evitan el goteo o mezcla de gases. Cierres o sellos de capas múltiples (*b*) soportan diferencias de presión de hasta 50 atmósferas por cada 10 centímetros de longitud del eje. Otro dispositivo (*c*) amortigua oscilaciones en sistemas de máquinas controladas numéricamente, como registradores gráficos, donde se necesitan movimientos muy pequeños y de forma muy precisa. El amortiguamiento se consigue a través de una masa inercial constituida por imanes que autolevitan en un ferrofluido encerrado en una cámara que gira con el eje. En un altavoz (*d*) se mantiene un ferrofluido por el imán en forma de anillo que rodea al cono. El ferrofluido aumenta la capacidad de potencia y hace más plana la respuesta en frecuencia del altavoz.

fluido constituye el fundamento de varios procesos para la separación de materiales de distinta densidad. Los métodos ordinarios de separación por flotación utilizan líquidos pesados, pero no logran separar sustancias con una gravedad específica superior a 5. Además, muchos de los líquidos son tóxicos. Las fuerzas de levitación magnéticas que se pueden establecer en un ferrofluido poseen un vigor suficiente para hacer flotar materiales de cualquier densidad. La única condición exigida es que el material no sea magnético.

En los Estados Unidos se ha diseñado una planta piloto de ferrofluido para separación industrial de chatarra, incluidos materiales no férreos de automóviles. La Oficina de Minas ha demostrado que los ferrofluidos pueden separar los metales que quedan después de la incineración de residuos sólidas. En Japón, Hitachi Ltd. separa los componentes de aluminio, zinc y cobre para equipos electrodomésticos. También se sabe que en la Unión Soviética se emplean soluciones de sales paramagnéticas para análisis mineralógicos y que un proceso similar se sigue en la separación de diamantes de la roca en Africa del Sur. Los ferrofluidos han encontrado aplicaciones en el control de pantallas alfanuméricas y en la detección de dominios magnéticos, así como en otras estructuras metalúrgicas.

Todavía no se ha explotado en los ferrofluidos un importante fenómeno ferromagnético: el del cambio de la intensidad magnética con la temperatura causado por una disminución en la magnetización. A temperaturas próximas al punto de Curie, un pequeño aumento en la temperatura determina una cuantiosa reducción en la magnetización. La razón de ello yace en que la agitación térmica interrumpe la alineación paralela de los momentos magnéticos dipolares individuales dentro de cada dominio magnético. Por ser la temperatura una medida de la no ordenación o desorden, una muestra de material que esté aislada térmicamente del medio que la rodea debe enfriarse cuando se magnetiza. Del mismo modo, una muestra que se magnetiza mientras se mantiene a temperatura constante tiene que transferir calor al medio que la rodea a medida que se vuelve más ordenada desde el punto de vista magnético.

Con E. L. Resler, Jr., de la Universidad de Cornell, he analizado una máquina "magnetocalórica" que emplea un coloide magnético como fluido de trabajo. La máquina consta de un imán, una fuente de calor, un refrigerador y un tubo lleno de ferrofluido. Una vez que el ferrofluido está en movimiento, circula a través del circuito transfiriendo calor desde la fuente al refrigerador, con capacidad para realizar trabajo. A medida que el fluido abandona el refrigerador, es atraído hacia el imán, donde eleva su temperatura a expensas de la fuente de calor que está dentro del campo del imán. Al aumentar su temperatura, la magnetización del fluido disminuye y abandona la región de campo magnético. El refrigerador enfría el fluido hasta su temperatura original, preparándolo para el ciclo siguiente. La máquina podría diseñarse de suerte que el líquido moviera una turbina o pasara a través de un generador magnetohidrodinámico para la producción directa de electricidad. Se puede mostrar cómo la eficiencia térmica de la máquina de ferrofluido puede acercarse a la de un ciclo de Carnot, límite infranqueable por máquina alguna. Cabe la posibilidad de que el ciclo de ferrofluido encuentre aplicación en bombas con muy pocas partes móviles, en dispositivos para enfriamiento e incluso en la producción de energía eléctrica a partir de fuentes bajas de calor. Un sistema solar de calefacción con un fluido magnético realizaría su propia circulación.

Muchos dispositivos industriales se basan en convección térmica para la transferencia de calor; también aquí los ferrofluidos pueden cumplir un nuevo e interesante papel. La convección tiene lugar cuando un fluido se calienta de un modo no uniforme: es el caso típico de un fluido encerrado en un recipiente que se calienta en su parte inferior y se enfría en su parte superior. Las capas inferiores calientes se hacen menos densas que las superiores frías, dando lugar a una configuración inestable. Cuando la diferencia de temperatura entre el fondo y la parte superior excede un valor crítico, se desarrolla una ciruclación de fluido de capas pesadas y ligeras a instancia de la gravedad.

Cuando se aplica un gradiente de campo magnético (más intenso en el fondo del recipiente que en su parte superior) a un ferrofluido caliente, induce convección que puede ser de mayor efecto que la convección gravitatoria. La circulación débese en mayor medida a cambios en la magnetización del fluido con la temperatura que a cambios en densidad. El efecto es aprovechable para disipar calor de los motores, transformadores y otros equipos eléctricos donde ocurran campos magnéticos. Estoy convencido de que los ferrofluidos encontrarán muchas otras aplicaciones en las que todavía nadie ha pensado.

Macareos de marea

Un macareo es el equivalente hidráulico de un estampido sónico: un muro móvil de agua que arrastra la marea curso arriba en algunos ríos que desembocan en el mar. La corriente sigue remontándose varias horas después de haber pasado

David K. Lynch

Estábamos apiñados a la orilla del río una fría noche de primavera, tomando té y calentándonos las manos en la hoguera. Una luna llena brillaba a ráfagas entre las nubes y rielaba en el agua. De pronto, del curso bajo del río se oyó gritar: "¡Qué se desborda!". Subimos raudos el margen entre un retumbo sordo y grave. Al llegar a la parte alta, una pared de agua de metro veinte de altura pasó bajo nosotros más rápida de lo que podíamos correr. La ola remontaba el río arrastrando consigo troncos y ramas. En los pocos minutos que tardó la onda en salir del ámbito que alcanzaba nuestro oído, el nivel del agua subió otros 60 centímetros. Gradualmente, la turbulencia cedió en suaves remolinos, y al cabo de una hora el río empezó de nuevo su discurrir hacia el mar.

Fue así como, en 1978, tuve mi primera experiencia sobre el macareo de marea en el río Severn, en la región sudoccidental de Gran Bretaña. Un macareo es un fenómeno hidrodinámico notable: la marea entrante en forma de ola que remonta un río en su desembocadura en el mar. Tras su paso, el río sigue fluyendo aguas arriba durante cierto tiempo, hasta que la corriente invierte de nuevo su curso. Para que en un río se produzcan macareos deben concurrir dos condiciones. Las mareas en el cuerpo adyacente han de ser excepcionalmente altas; por lo general se requiere una diferencia de más de 6 metros entre pleamar y bajamar. Además, el río debe ser somero, con un fondo de pendiente suave y un estuario ancho infundibuliforme. A medida que la marea entrante se ve forzada a subir por la boca fluvial que se estrecha, su altura crece hasta materializarse en una única onda y sube río arriba.

El macareo se encuadra en el grupo de ondas llamadas solitarias, que aparecen bajo numerosas formas y en muchos otros medios, además del agua; se las ha observado hasta en la atmósfera de Marte. Su propiedad más interesante es que no se dispersan. Al igual que todas las ondas, un macareo de marea consta de múltiples ondas sinusoidales de muchas longitudes de onda diferentes. En agua profunda, las ondas componentes se desplazan a velocidades diferentes y se separan una de otra. Sin embargo, dado el tipo de interacción que se establece entre las ondas de agua somera y el fondo del estuario, las ondas componentes del macareo se mueven a la misma velocidad. De ahí que, en lugar de dispersarse, se propaguen juntas río arriba en un único muro de agua. Tales ondas solitarias resultan curiosas y atractivas por sí mismas, pero revisten además un interés práctico porque ofrecen la solución a problemas de varias disciplinas científicas.

Los macareos son esquivos. Varían de un río a otro e incluso de una marea a otra. Tampoco se los ha estudiado mucho en lo que llevamos de siglo. Cualquier generalización deberá, por tanto, calibrarse con cautela. Según hemos visto, un macareo es una onda solitaria que transporta una marea río arriba. Su altura puede ser sólo de un palmo o alcanzar los ocho metros; la mayoría de ellos son más altos en las márgenes que en el centro del cauce. La formación del macareo representa el cambio de la marea. Adquieren mayor volumen y vigor en las fases de luna nueva y luna llena, cuando las mareas son máximas.

Puesto que la corriente fluye hacia arriba tras el paso del macareo, el frente de la onda divide el río en partes con sentidos de flujo opuestos. Cabe resaltar que el río no fluye ladera arriba cuando pasa el macareo. Dado que el nivel de agua inmediato al fenómeno queda más alto que por delante del mismo, el agua fluye río arriba pero cuesta abajo.

Al remontar el río, el macareo puede tener una cresta rompiente, como la de una ola en una playa litoral, o formar una onda roma suavemente arqueada. Un macareo rompiente constituye un muro espumeante de agua turbulenta que avanza estrepitosamente corriente arriba. Los que no rompen se llaman macareos ondulares; a ellos suelen seguirles varias ondas menores, que, en el caso del río británico Trent, se las conoce por "*whelps*"; a las del Sena las llaman "*etueles*". He visto hasta 55 ondas menores seguir a un macareo en uno de los afluentes del Amazonas.

Que un macareo determinado sea rompiente u ondular depende de la altura de la marea, la profundidad del río, la configuración del fondo y la velocidad y dirección del viento. Muchos macareos son ondulares en el centro del cauce y rompientes en la orilla. En algunos ríos, puede ser ondular en una marea y rompiente en la siguiente. E incluso cambiar de forma al variar la profundidad del río.

Hay macareos en muchos lugares del planeta. No son específicos de ninguna región, si bien tienden a formarse en lugares donde las mareas son máximas; así, junto a las costas británica y francesa, en ríos que desaguan en el océano Indico y en la desembocadura del Amazonas. La formación de un macareo está determinada por las condiciones locales que reinan en la desembocadura. Se ha prestado escasa atención a los macareos en las últimas décadas, razón por la cual se desconoce con precisión en cuántos ríos se desarrollan. En unión con Susan B. Bartsch-Winkler, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, estoy compilando un catálogo de los principales macareos del mundo.

En América del Norte se registran varios ejemplos notables. El más llamativo es el del río Petitcodiac, en Nueva Escocia, que vierte a la bahía de Fundy. Los hay también espectaculares en Turnagain Arm y Knik Arm, que desembocan en la ensenada de Cook, cerca de Anchorage, Alaska. En Turna-



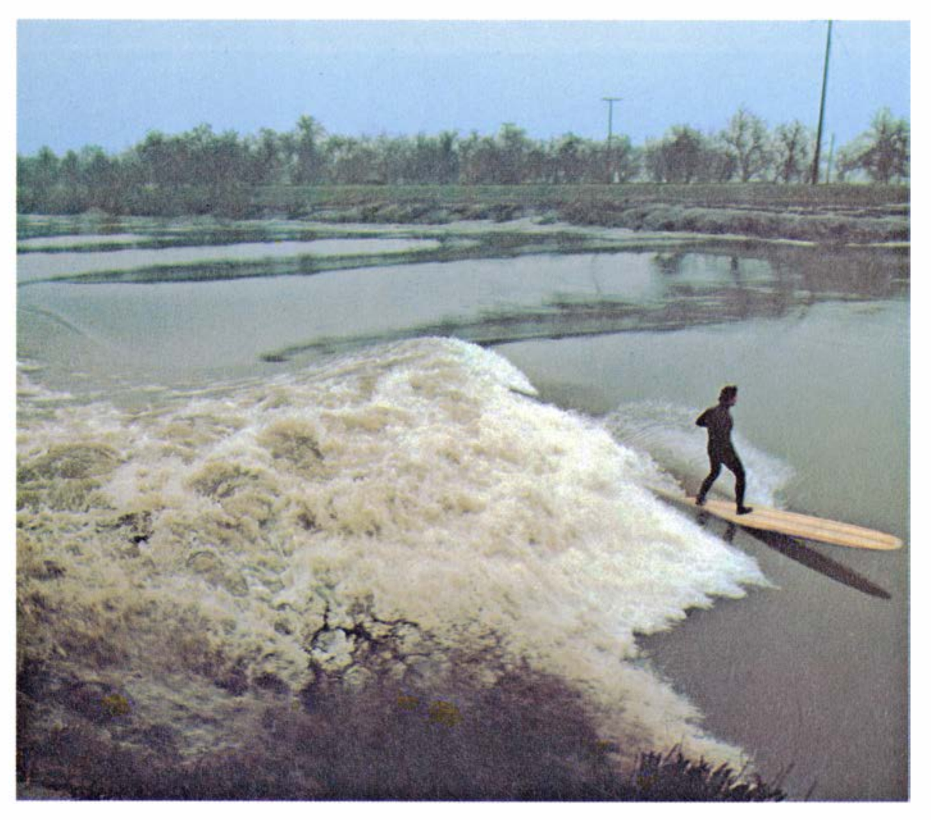
MACAREO REMONTANDO EL SENA a su paso por la ciudad de Caudebec en una fotografía tomada en 1963. Su magnitud se ha reducido mucho desde entonces merced a las medidas de control portuario en Le Havre. El macareo del Sena, llamado mascaret, era temible por su gran fuerza destructora.



MACAREO SUBIENDO POR EL ARAGUARI, río de la cuenca amazónica, en una fotografía aérea tomada por el autor. Conocido por la pororoca, el macareo del Amazonas y sus afluentes alcanzan casi ocho metros de altura. Aquí tiene metro y medio de alto y avanza a unos 16 kilómetros por hora. Los macareos pueden ser rompientes, como olas espumeantes de una playa, o lisos y romos, éstos llamados ondulares. Muchos macareos son ondulares en el centro del cauce y rompientes junto al margen, donde el agua somera frena la ola. Esta es la configuración que muestra aquí la pororoca. Inmediatamente en frente de un macareo ondular, el agua es lisa, pero a menudo una serie de crestas menores sigue a la ola principal río arriba, como en la imagen.



MACAREO DEL TURNAGAIN ARM, cerca de Anchorage, Alaska. Es uno de los pocos de Norteamérica. Suele medir de 0,6 a 1,5 metros de altura y, como se ve, su borde delantero no es recto ni uniforme, pues la profundidad del Turnagain Arm varía. Las partes del macareo que se hallan en agua profunda avanzan más deprisa que las de agua somera. Aquellas son ondulares, y rompientes las lentas.



MACAREO DEL SEVERN, el mayor de Gran Bretaña. Se trata de un fuerte macareo rompiente cuya cresta es lo bastante grande para que los surfistas remonten el río varios kilómetros. El macareo se forma cerca del puente sobre el Severn, que queda por encima de Sharpness, y llega hasta Gloucester. Para que se forme un macareo deben coincidir dos condiciones. Primero, debe existir un estuario ancho que se estreche hacia la desembocadura del río y tenga un fondo somero de pendiente suave. Tal configuración canaliza en embudo la marea creciente, incrementando su altura. El estuario del Severn, de Cardiff a Bristol, tiene la forma constreñida conveniente. Segundo, las mareas de la cuenca adyacente deben ser muy altas, pues aunque el agua fluye río arriba, se desliza cuesta abajo. Para que se forme el macareo del Serven suele requerirse una diferencia de más de nueve metros entre pleamar y bajamar.

gain Arm y Knik Arm, ciertas águilas apresan peces siguiendo los macareos que penetran tierra adentro desde el Pacífico; la turbulencia del macareo hace aflorar los peces a la superficie.

Tal vez el más célebre de todos sea uno del curso inferior del Sena, llamado el mascaret. Este ha perdido mucho con el aterramiento del cauce del río en su desembocadura, pero había sido famoso por su capacidad de destrucción. En 1843, la hija de Victor Hugo, Léopoldine, y su marido, Charles Vacquerie, se hallaban en una barca en las proximidades de Rouen cuando el mascaret azotó el río. El macareo expulsó a Léopoldine del bote; Charles saltó para salvarla, pero no pudo nadar y ambos se ahogaron. Hugo dejó memoria de ellos en el poema "À Villequier", pero no menciona el macareo.

Algunos han entrado en el campo del mito y las liturgias populares. El pasaje con que comienza este artículo describe mi experiencia en la celebración anual de primavera en el Severn, cerca de Gloucester. Las transparentes angulas, localmente llamadas "elvers", que viven en el fondo del Severn, son la comida tradicional de Viernes Santo. Cuando el macareo sube, desplaza a las anguilas jóvenes. Cuando el Severn vuelve a bajar, los vecinos de Gloucester las capturan con redes. Las que no se consumen o llevan al mercado local se venden a los comerciantes, que las fletan por avión a piscifactorías de anguilas, muchas de ellas situadas en Oriente. De día, el macareo del Severn sirve de recreación para los amantes del "surf", que se deslizan río arriba muchos kilómetros.

La extensa cuenca del Amazonas cuenta con un macareo conocido como la pororoca, que sube por el río y sus afluentes. La pororoca puede alcanzar ocho metros de altura y varios kilómetros de sección. Su magnitud y fuerza hacen al Amazonas completamente innavegable durante el paso del macareo. La suavidad de la pendiente del Amazonas determina que los efectos de la marea puedan detectarse a 800 kilómetros curso arriba desde la desembocadura fluvial.

El macareo de marea más poderoso es el del río chino Tsien-tang, cuya velocidad llega a ser de unos 15 nudos y al que en otros tiempos explotaban los pescadores locales como medio de propulsión. Su potencia es máxima cerca de Hangchow, que un día fuera capital imperial. Según una leyenda china, el macareo del Tsien-tang se desató sobre Hangchow para castigar a un emperador que había ordenado el asesinato de un popular general, presunto rival

suyo. Como las ceremonias de quema de papel y ofrendas de alimentos no lograban apaciguar a los espíritus airados, el emperador erigió una gran pagoda como gesto propiciatorio máximo. La pagoda Bhota sigue todavía en pie cerca de Hangchow y, aunque el macareo no desapareció después de construirse la pagoda, se dice que es ahora algo menos violento.

Cuán esquivos sean esos fenómenos podemos inferirlo del hecho siguiente: Marco Polo, que pasó 18 meses en Hangchow en el siglo XIII y escribió un relato detallado de su estadía, no menciona el macareo. Habida cuenta de su aparatosidad, cuesta creer que el explorador italiano viera el del Tsien-tang y no dejara constancia de su impresión. Resulta más verosímil que el macareo fuera mucho menor en el siglo XIII. Cambios en la configuración local del terreno causados por terremotos y variaciones menores del lecho del río hacen intermitentes algunos macareos. Relatos contemporáneos sobre la rebelión de los Taiping, en el siglo XIX, indican que hace un siglo el macareo del Tsien-tang era mucho menor que hoy.

La gran mayoría de macareos se desarrollan cerca de la desembocadura de un río, pero también pueden formarse algunos en otras circunstancias. En regiones costeras de llanos de marea anchos y arenosos extendidos entre los niveles de pleamar y bajamar, la marea creciente puede enroscarse sobre los médanos y precipitarse hacia tierra como una única ola bien definida. La región de Mont-St. Michel, en Francia, es célebre por su marea, que cubre los llanos más deprisa que los cruza un caballo al galope. Un tsunami, ola común de agua de gran longitud de onda generada por un movimiento sísmico del fondo oceánico, puede producir un macareo que suba por un río donde normalmente no se desarrollen.

Se dan otras condiciones de formación de macareos. En febrero de 1976, una rara combinación de pleamar, lluvia intensa, vientos de más de 180 kilómetros por hora y presión atmosférica baja desencadenaron un maretazo de marea que subió por el río Penobscot, en Maine. En Bangor el río subió 6 metros en 15 minutos y provocó la única inundación de la historia del Bangor que llegó del curso bajo. Como ejemplo de macareo en un medio no fluvial cabe citar una onda parecida a un macareo que se observa en la atmósfera de Marte, cerca de la Cordillera Tharsis, durante las horas matutinas, al acabar la primavera y comenzar el verano. Estas ondas solitarias aparecen como cambios locales en las propiedades refractivas de la atmósfera marciana en una distancia relativamente corta.

PAIS	RIO O CANAL	CUERPO DE MAREA	SITUACION DEL MACAREO (SI SE CONOCE)
BANGLADESH	GANGES	BAHIA DE BENGALA	—
BRASIL	AMAZONAS	OCEANO ATLANTICO	—
	CAPIM	OCEANO ATLANTICO	CAPIM
	CANAL DEL NORTE	OCEANO ATLANTICO	—
	GUAMA	OCEANO ATLANTICO	CAPIM
	TOCANTINS	OCEANO ATLANTICO	—
	ARAGUARI	OCEANO ATLANTICO	—
CANADA	PETITCODIAC	BAHIA DE FUNDY	MONCTON
	SALMON	BAHIA DE FUNDY	TRURO
CHINA	TSIEN-TANG	MAR DE LA CHINA ORIENTAL	DE HAINING A HANGCHOW
INGLATERRA	SEVERN	CANAL DE BRISTOL	DE FRAMILODE A GLOUCESTER
	PARRETT	CANAL DE BRISTOL	BRIDGWATER
	WYE	CANAL DE BRISTOL	—
	MERSEY	MAR DE IRLANDA	DE LIVERPOOL A WARRINGTON
	DEE	MAR DE IRLANDA	—
	TRENT	MAR DEL NORTE	DE GUNNESS A GAINSBOROUGH
FRANCIA	SENA	CANAL DE LA MANCHA	CAUDEBEC
	ORNE	CANAL DE LA MANCHA	—
	COUESNON	GOLFO DE ST. MALO	—
	VILAINE	GOLFO DE VIZCAYA	—
	LOIRE	GOLFO DE VIZCAYA	—
	GIRONDE	GOLFO DE VIZCAYA	ISLAS DE MARGAUX
	DORDOGNE	GOLFO DE VIZCAYA	DE LA CAUNE A BRUNNE
	GARONA	GOLFO DE VIZCAYA	DE BORDEAUX A CADILLAC
INDIA	NARMADA	MAR DE ARABIA	—
	HOOGHLY	BAHIA DE BENGALA	DE HOOGHLY POINT A CALCUTA
MEXICO	COLORADO	GOLFO DE CALIFORNIA	DELTA DEL COLORADO
PAKISTAN	INDO	MAR DE ARABIA	—
ESCOCIA	SOLWAY FIRTH	MAR DE IRLANDA	—
	FORTH	MAR DE IRLANDA	—
ESTADOS UNIDOS	TURNAGAIN ARM	ENSENADA DE COOK	DE ANCHORAGE A PORTAGE
	KNIK ARM	ENSENADA DE COOK	

RELACION DE MACAREOS DE MAREA, que demuestra su difusión por todo el planeta. Se ha prestado poca atención sistemática a los macareos de marea en este siglo, de ahí que la relación sea incompleta. El autor está reuniendo una lista de los principales macareos y espera que comprenda casi el doble de los recogidos en este cuadro. Los macareos no se concentran en ninguna región del mundo, pues su existencia depende de condiciones locales: las mareas y la topografía de la desembocadura del río. Tales condiciones pueden alterarse mediante medidas de control portuario, represamiento o cambios naturales en el lecho del río, de ahí que las extensiones que se indican en el cuadro sean sólo aproximadas. El mayor de todos los macareos es el del Tsien-tang, en China, que llega a alcanzar hasta 15 nudos de velocidad.

Más allá del espectáculo que se vive desde la margen del río (o en Marte), comprender la física de los macareos requiere una valoración de las mareas, del movimiento de las olas y de la topografía de la desembocadura de los ríos. Las mareas se deben a la gravedad y la inercia. La fuerza gravitatoria es principalmente la de la Luna. Dado que la fuerza de la gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre dos objetos que se atraen, la Luna ejerce una atracción más fuerte en el lado de la Tierra más próximo a ella que en el más distante. La diferencia de la atracción en los dos lados es de un 13 por ciento, que tiende a alargar la Tierra a lo largo del eje que pasa por su centro y el de la Luna. La inercia de la Tierra al girar en torno al centro del sistema Tierra-Luna tiende a desviar el planeta de su forma esférica.

Naturalmente, los océanos responden más a tales fuerzas que los continentes. Por eso, los océanos fluyen en dos abombamientos de marea. Uno mira a la Luna y el otro se aleja de ella en sentido opuesto; entre ambos, el agua es más somera. Dado que nuestro satélite tarda unos 28 días en dar la vuelta al planeta, los abombamientos de ma-

rea tardan el mismo período en ir recorriendo la Tierra, mientras siguen a la Luna. La vuelta diaria de la Tierra sobre su eje determina que cada punto de la superficie entre y salga de cada abombamiento de marea aproximadamente una vez al día. Para un observador situado en tierra, las mareas parecen subir y bajar dos veces al día. Un observador suspendido sobre la Tierra, en cambio, vería que lo que en realidad ocurre es que cada punto del planeta se arremolina hacia adentro y hacia afuera del abombamiento de marea.

La Luna gira en órbita alrededor del planeta en el mismo sentido en que éste procede. En lo que tarda un punto de la Tierra en girar la mitad del trayecto, los domos de marea han avanzado con la Luna, y el punto tiene que avanzar para volver a entrar en el domo. Así pues, transcurren poco más de 12 horas entre las pleamares: el período es de 12 horas 25 minutos.

Si no hubiera continentes que impidieran el movimiento de las mareas, cada punto de toda costa tendría dos mareas diarias. En muchos lugares hay mareas de éstas, llamadas semidiurnas. Pero otros tienen un modelo de marea diferente. La onda de la marea se refleja y estrella en los continentes y forma una complicada serie de crestas y depresiones que distan miles de kilómetros. Además, en algunas regiones las mareas van emparejadas con el movimiento de grandes cuerpos de agua cercanos. En consecuencia, algunos lugares sólo registran una marea al día, llamada marea diurna. Unos pocos lugares (entre ellos Tahití) prácticamente no tienen marea alguna, por hallarse en un nodo de marea, un punto estacionario alrededor del cual oscila la onda constante.

También el Sol levanta una marea, cuya magnitud es la mitad de la marea lunar, por hallarse el astro mucho más lejos de la Tierra que la Luna. La amplitud de la marea global (la diferencia entre los niveles de pleamar y bajamar) depende de la relación entre la marea solar y la marea lunar y, por consiguiente, de las posiciones del Sol, la Luna y la Tierra. La amplitud de la marea alcanza su máximo dos veces al mes, para luna nueva y luna llena, cuando los tres cuerpos están alineados según la configuración conocida como sicigia; es la época de las mareas "vivas". La amplitud es mínima en los cuartos primero y tercero de la Luna, cuando el Sol, la Luna y la Tierra forman un ángulo recto y las mareas solar y lunar se oponen entre sí; es la época de las mareas muertas.

Queda claro, pues, por qué los macareos suelen formarse en luna nueva y luna llena: cuando es máxima la amplitud de las mareas. La resonancia puede incrementar aún más la amplitud. Todo recipiente de líquidos posee una frecuencia natural de oscilación. Si el líquido del vaso se pone en movimiento, puede oscilar adelante y atrás en una ola única coherente con la frecuencia natural. A escala de una taza de café, la oscilación se ve como un vaivén. Puede haber también olas con varias frecuencias diferentes en el movimiento del líquido. La frecuencia más baja, la fundamental, es la que más incide en la resonancia.



EL MACAREO DEL PETITCODIAC remonta ese río hasta la ciudad de Moncton, Nueva Brunswick, en el Canadá. La bahía de Chignecto es el cuerpo que se estrecha y que sirve para confinar la marea entrante. La cuenca de marea adyacente es la bahía de Fundy, célebre por sus amplísimas mareas: hasta más de 15 metros entre pleamar y bajamar, amplitud que alcanza su máximo en marea viva de luna nueva y luna llena. La mayoría de los macareos se forman en marea viva. El río Salmon tiene un macareo menor, que llega desde la bahía de Cobequid hasta Truro, Nueva Escocia. Ilustración de A. Tomko.

El tiempo que tarda una ola de frecuencia fundamental en ir y volver de un lado a otro del envase se llama período fundamental, intervalo que viene determinado por la profundidad del agua y las dimensiones del recipiente. En una cuenca cerrada, el período fundamental viene a ser el doble de la dimensión máxima de la cuenca dividido por la velocidad de las olas. En un lago, que constituye una de esas cuencas cerradas, las oscilaciones naturales de gran escala se llaman "seiches". A menudo las provoca un sistema de baja presión atmosférica en un extremo del lago; pueden provocar graves daños.

En una cuenca abierta por un extremo a un cuerpo de agua mayor el período fundamental viene a ser el cuádruplo de la dimensión mayor dividido por la velocidad de la ola. Hace las veces de tal la cuenca de marea inmediata a la desembocadura de un río, y el océano proporciona el impulso de marea. El efecto de la oscilación natural es elevar la altura del agua en un extremo de la cuenca al principio y final del período fundamental y bajarla en medio del período, cuando el agua va y viene oscilando según un modelo de cresta y depresión. Por ejemplo, si el período fundamental es de 12 horas, el agua de un extremo estará alta, pongamos por caso a mediodía, baja a las seis de la tarde, alta a medianoche, etcétera.

Si el período fundamental se aproxima al intervalo de marea de 12 horas 25 minutos, la cuenca resonará con la marea que entra. La marea entrante hace oscilar el agua de la cuenca. El movimiento de la marea que entra hacia la desembocadura del río y el movimiento de la oscilación están sincronizados. Por consiguiente, la oscilación refuerza la marea en la bahía y hace que la pleamar resulte más alta y la bajamar más baja de lo que cabría esperar.

La resonancia también puede determinar cierta asimetría entre la marea del extremo oceánico de la cuenca y la marea próxima a la desembocadura del

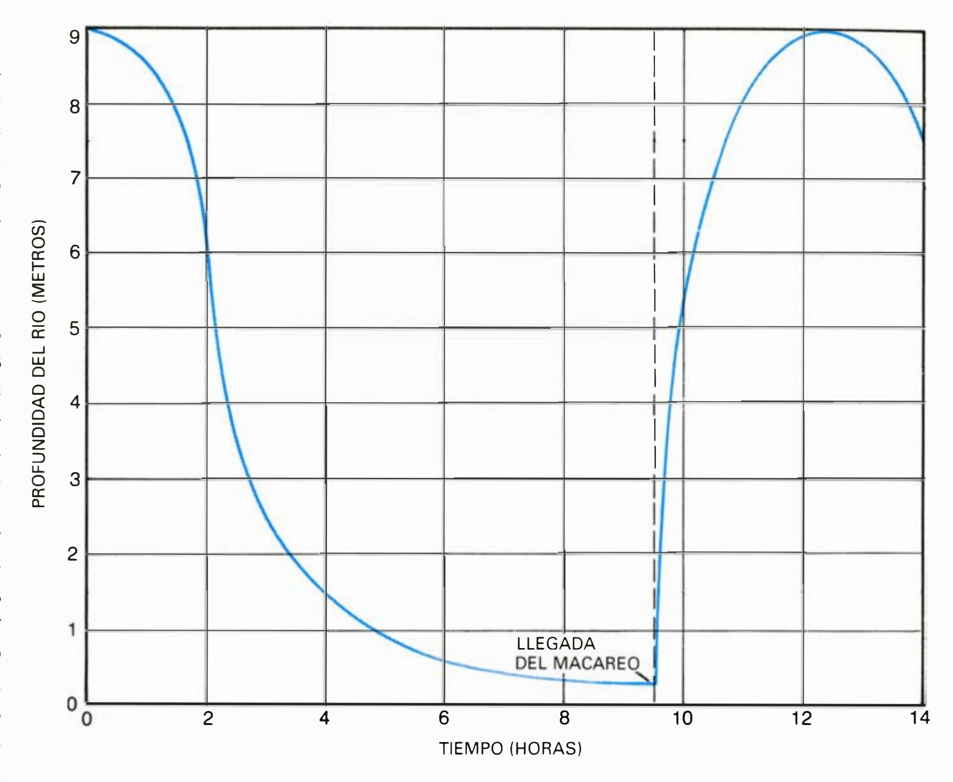
río. En algunos casos, la desembocadura fluvial queda en un nodo de la ola que representa el movimiento oscilatorio; según hemos visto, un nodo es un punto fijo en torno al cual oscila el agua. En el nodo, la marea es mucho menor que cerca de la desembocadura fluvial.

Si bien cualquier cuerpo de agua con mareas altas puede generar un macareo, aproximadamente la mitad de los macareos conocidos están asociados con cierta resonancia en una cuenca de marea. Un ejemplo excelente de tal resonancia es la bahía de Fundy, famosa por la amplitud de más de 15 metros de sus mareas. El período fundamental de la bahía de Fundy es de 11 horas, valor suficientemente próximo al del intervalo de marea semidiurna para que las mareas obliguen a la bahía a resonar y enviar, Petitcodiac arriba, un macareo de marea. La ensenada de Cook, en Alaska, resuena con tal fuerza que los cuatro metros de marea de su boca se convierten en más de nueve metros en Anchorage.

Las salidas al mar de muchos ríos experimentan macareos. En la desembocadura del río las mareas son simétricas: flujo y reflujo duran unas seis horas cada uno. Curso arriba, las mareas devienen progresivamente asimétricas: entre bajamar y pleamar transcurre un lapso menor que entre pleamar y bajamar, porque la marea entra muy deprisa pero sale gradualmente, con la corriente. La presencia de un macareo tiende a exagerar la asimetría: la marea sube por el río rápidamente, en forma de onda solitaria.

Las mareas y su resonancia con la oscilación en una cuenca de marea proporcionan, por tanto, la energía para el macareo de marea. Sin embargo, en la forma del macareo influye principalmente la dinámica de las olas. En el agua se dan dos clases de olas: las capilares y las de gravedad. La longitud de onda de las capilares es de escasos milímetros, si no menor, y la fuerza que restablece la superficie del agua a su estado no perturbado cuando han pasado es la tensión superficial. Tales ondas apenas tienen nada que ver con los macareos de marea.

En cuanto a las ondas de gravedad, la fuerza que devuelve la superficie a su estado no perturbado es la gravedad. Tales ondas pueden dividirse en dos tipos en base a la relación entre la longitud de onda y la profundidad del agua a través de la cual se propaga la ola. Aquellas cuya longitud de onda es mucho más breve que la profundidad se llaman ondas de agua profunda. Se mueven a una velocidad proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de onda. Una ola de agua profunda con una longitud de onda larga se desplaza más deprisa que otra de longitud de onda más corta.



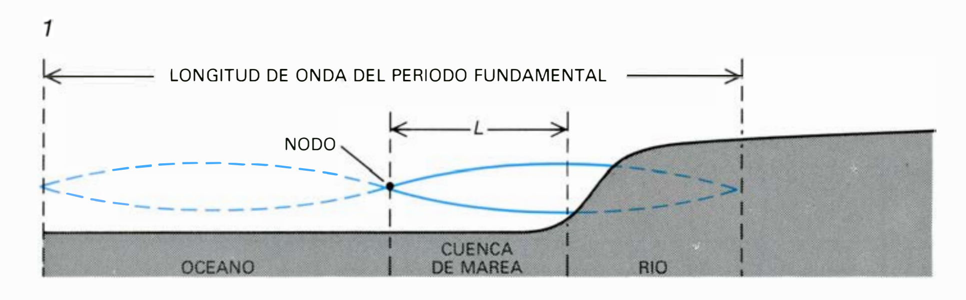
PROFUNDIDAD DEL PETITCODIAC, que refleja el súbito aumento de nivel asociado con la llegada del macareo. La curva indica la profundidad del río cerca de Moncton. En bajamar, el Petitcodiac apenas llega al metro de agua. La llegada abrupta del macareo incrementa inmediatamente la profundidad de 60 a 90 centímetros. Una vez pasado el macareo, el río sigue subiendo durante más de dos horas para, finalmente, alcanzar una profundidad máxima de unos 9 metros. En el gráfico se aprecia la asimetría que suele presentar la marea en los ríos con macareos. Transcurren en este caso más de nueve horas de pleamar a bajamar, porque la marea sale gradualmente con la corriente. En cambio, suelen pasar sólo dos horas y media entre bajamar y pleamar, pues la marea entra súbitamente en forma de macareo.

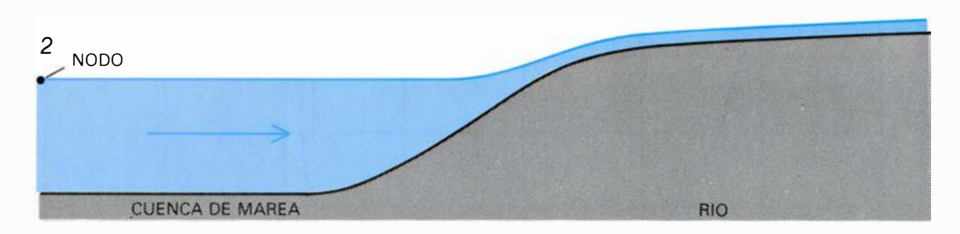
Esta propiedad de las olas de agua profunda determina su dispersión. Las olas acuáticas reales no son ondas sinusoidales simples, de longitud de onda única; comprenden numerosas componentes sinusoidales, cada una con una longitud de onda diferente. Dado que cada componente se propaga a una velocidad distinta, la forma de la ola de agua profunda va cambiando incesantemente conforme las componentes más rápidas atrapan a las más lentas, se unen a ellas y las dejan rezagadas.

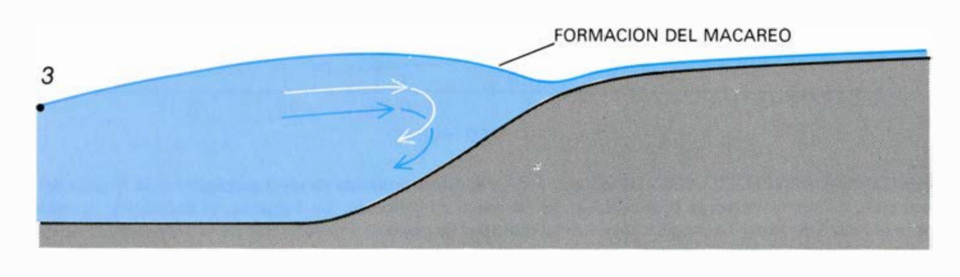
Las ondas de gravedad con una longitud de onda mucho más larga que la profundidad del agua se llaman ondas de agua somera. La velocidad de una onda de agua somera depende únicamente de la profundidad del agua; es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad. Por tanto, en un agua de una profundidad determinada, todas las ondas se propagan a la misma velocidad. De lo que resulta que no se dispersan, sino que avanzan juntas con sus formas relativamente inalteradas. Conviene tener presente que los calificativos "de agua profunda" y "de agua somera" se basan en la relación entre la longitud de onda y la profundidad, y no en la profundidad absoluta del agua ni en la longitud de onda. Por ejemplo, una ola con una longitud de onda de un metro, por los océanos se propagará como onda de agua profunda, pero en una bañera lo hará como ola de agua somera.

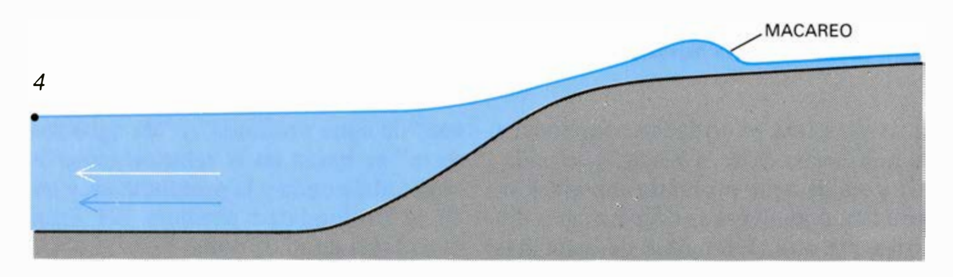
La diferencia entre olas de agua profunda y olas de agua somera constituye una base para comprender la formación de macareos de marea. La marea entrante llega a una cuenca de marea en forma de ondas largas de propagación rápida. Al entrar en la cuenca, las olas quedan confinadas en las márgenes y el fondo por el estuario, que se estrecha. En virtud de esta acción de embudo, aumenta la altura de las olas. La transición de la marea a un macareo, subsiguiente al incremento de altura, se parece mucho al desarrollo de rompientes en olas que avanzan hacia una playa.

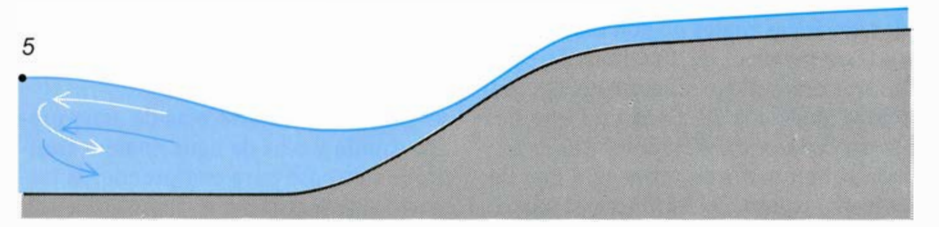
La transición de olas de agua profunda a olas de agua somera va asociada a refracción. Al entrar la marea e interactuar con el fondo, la refracción frena las olas. Las olas de mar abierto se hallan en agua más profunda; por eso











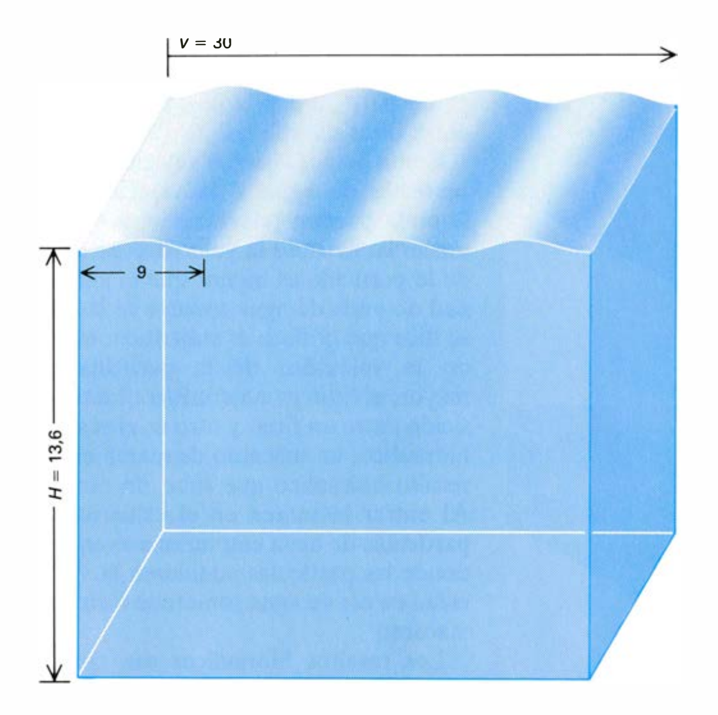
OSCILACION DEL AGUA en la cuenca de marea inmediata a la desembocadura de un río. Puede contribuir a la formación del macareo, pues aumenta la amplitud de la marea (uno de los factores que afectan al fenómeno). Los diagramas representan de manera esquemática la cuenca de marea, con el océano a la izquierda y la desembocadura del río a la derecha. Si el líquido de un recipiente se perturba, oscilará adelante y atrás en una ola única y coherente según un movimiento parecido al vaivén del café en una taza. El tiempo que tarda la ola en ir y volver de un lado a otro del vaso es el período fundamental. En una cuenca de marea, el período fundamental viene a ser el cuádruple de la longitud (*L*) dividido por la velocidad de la ola. A su vez, la velocidad es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad. Un cuarto de la longitud de onda se encaja en la cuenca en un momendo dado (*1*). En determinados casos existe un nodo, punto definido de la onda, en el extremo oceánico de la cuenca. En el nodo, las mareas son pequeñas; muy pronunciadas, en la desembocadura del río. Si el período fundamental es aproximadamente igual al período de 12 horas y 25 minutos comprendido entre pleamares, la oscilación reforzará la marea alta cerca de la desembocadura fluvial. Se trata de un efecto de resonancia, representado en los esquemas *2* a *5*. El período comprendido entre ambos es una cuarta parte del período fundamental. La marea (*flecha azul*) penetra en la cuenca desde el océano como onda que avanza hacia la desembocadura del río (*2*); la marea entrante se sincroniza con la oscilación (*flecha blanca*) del agua en la cuenca (*3*) y la ola se propaga por la cuenca hacia la boca del río. Si la marea sube lo bastante deprisa, en la desembocadura del río se forma un macareo. La marea se retira y el movimiento de vaivén invierte su sentido. El agua se desplaza entonces hacia la terminación oceánica de la cuenca (*4*), mientras el macareo avanza corriente arriba y la marea remonta el río. El nivel de las aguas cerca de la desembocadura del río cae cuando el vaivén regresa al extremo oceánico de la cuenca para unirse a la marea entrante. El ciclo se repite de nuevo (*5*). Aproximadamente la mitad de los macareos conocidos están asociados a resonancia.

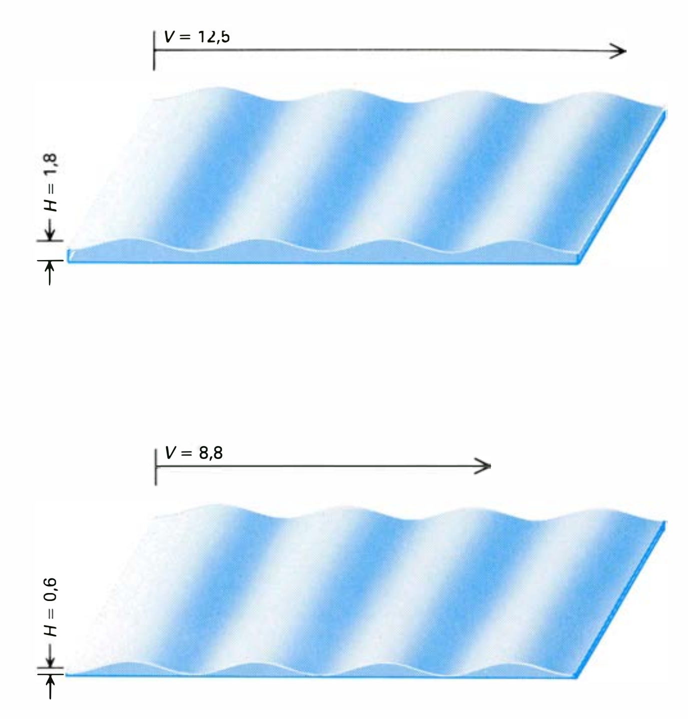
avanzan más deprisa que las inmediatas a la orilla. Lo que explica que, junto a la costa, la distancia entre crestas sucesivas se reduzca. Además, la cresta de cada ola, que se halla en agua más profunda que las depresiones adyacentes, empieza a atrapar la depresión delantera. La onda, hasta entonces simétrica, se convierte en asimétrica: la falda delantera se empina y la trasera se allana. Si la diferencia de profundidad es lo suficientemente acusada, la cresta empezará a romperse en la depresión y a formar un macareo.

Otro proceso significativo se desarrolla conforme la ola avanza hacia la orilla. En agua profunda, las olas transportan energía pero no transportan la propia agua. Cada "partícula", o pequeño volumen de agua, próxima a la superficie o en ella, describe un trayecto circular y regresa a su posición original cuando ha pasado la ola. En cambio, cuando las ondas de marea avanzan hacia la orilla, la refracción modifica el trayecto de circulación. La refracción se debe a la interacción de la ola con el fondo. (Es la refracción lo que frena las olas de agua somera en proporción a su longitud de onda y determina, por tanto, que todas las olas de agua somera se propaguen a la misma velocidad.)

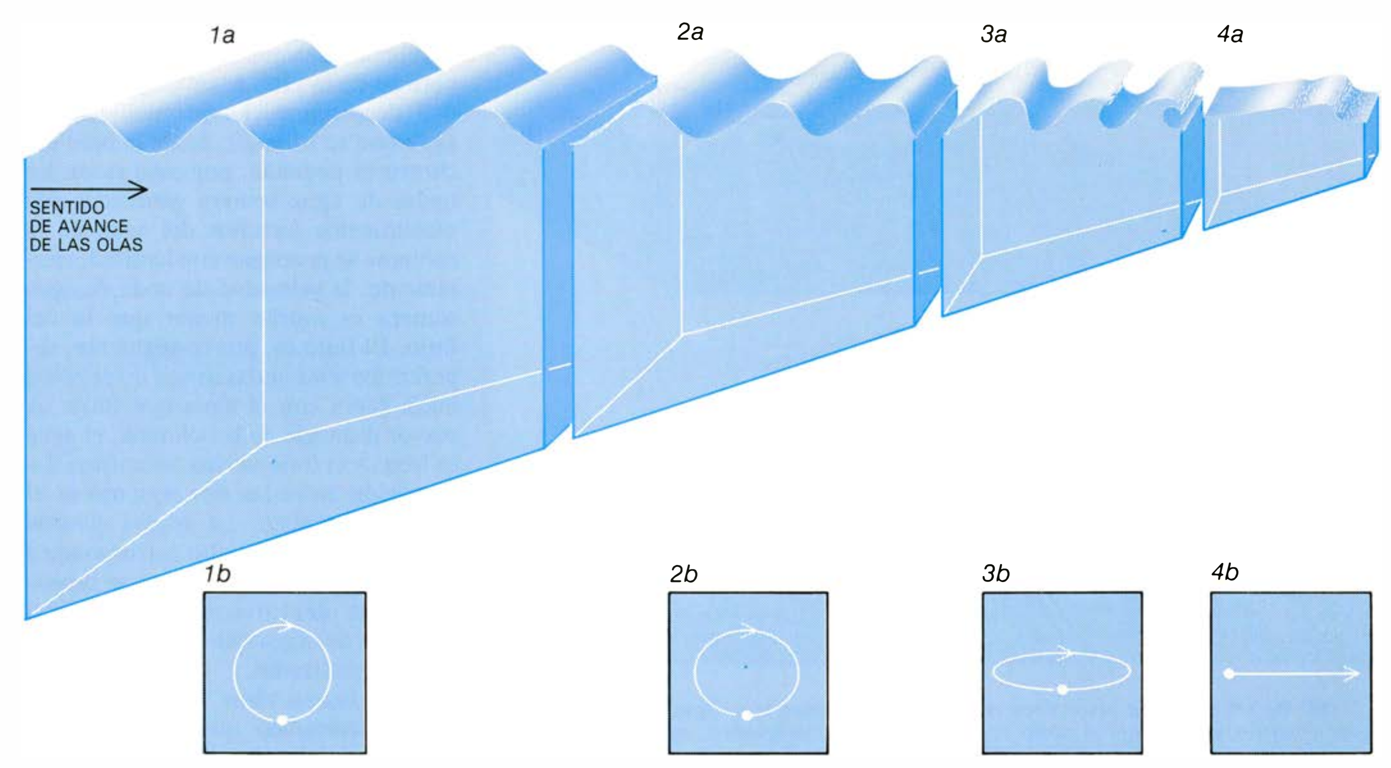
La trayectoria de las partículas de agua se aplana en una elipse por refracción conforme la ola remonta el estuario, las elipses de partículas cercanas a la cima de la ola se hacen más largas y aplanadas que las de las partículas inferiores. Cuando eso ocurre, se dice que la ola es inestable; las trayectorias de sus partículas tienden a devenir lineales en el sentido en que avanza la ola. A partir de cierto punto empieza el transporte de agua hacia tierra, acompañando al de energía.

Así pues, en el análisis de los macareos importan dos velocidades: la de la ola y la de la partícula de agua. Las relaciones entre esas velocidades son parte esencial de la hidrodinámica del macareo. El estudio de la hidrodinámica de ondas solitarias cuenta con un largo historial. John Scott Russell, ingeniero hidráulico, realizó el primer informe de una onda solitaria en el canal escocés de Glasgow y Ardrossan en 1840. Su descripción despertó el interés de numerosos investigadores, entre ellos el de Lord Rayleigh (John William Strutt), físico británico del siglo XIX que hizo numerosas contribuciones a la teoría de las ondas solitarias. Las ondas solitarias se habían concebido siempre como meras curiosidades matemáticas elegantes. Hoy se les ha encontrado im-



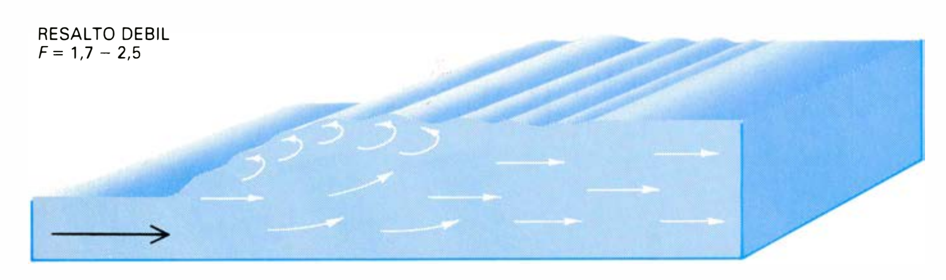


LA VELOCIDAD DE LAS OLAS en el agua depende de la relación entre la longitud de onda (distancia entre dos depresiones) y la profundidad del agua. En las olas de agua profunda (*izquierda*), cuya longitud de onda es mucho menor que la profundidad (*H*), la velocidad (*V*) es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de onda. (En el diagrama, la altura de la ola se supone que es pequeña, comparada con la profundidad del agua.) Una ola con una longitud de onda de 9 metros en una profundidad de agua de 30 metros avanza a una velocidad de 13,6 kilómetros por hora. Cuando la longitud de onda es mucho mayor que la profundidad, la velocidad es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad. Una ola de 9 metros de longitud de onda, a 1,8 metros de profundidad de agua, se mueve a una velocidad de 12,5 kilómetros por hora (*arriba, a la derecha*). En agua de 0,6 metros de profundidad, una ola de la misma longitud de onda se moverá a 8,8 kilómetros por hora (*abajo, a la derecha*). Dado que la velocidad de las ondas de agua somera depende únicamente de la profundidad, las olas con distintas longitudes de onda avanzan a la misma velocidad y no se dispersan. Los dibujos son de Ian Worpole.

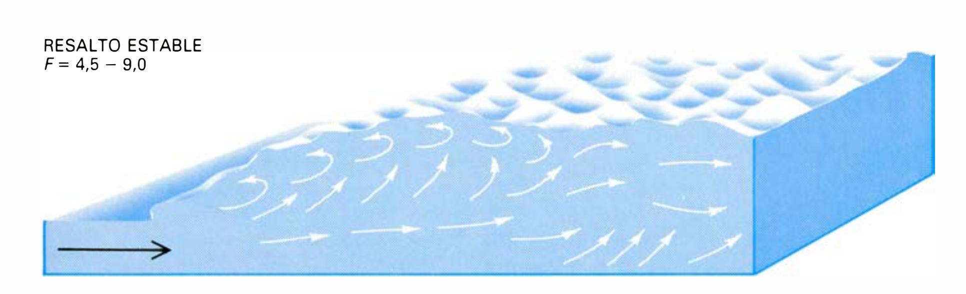


FORMACION DE UN MACAREO, resumida aquí de manera esquemática. Recuerda el desarrollo de una ola rompiente en una playa. El macareo se genera por conversión de las ondas rápidas de agua profunda que transportan la marea entrante en olas más lentas de agua somera, de menor longitud de onda. La conversión tiene lugar en el estuario. En agua profunda de mar abierto las olas son simétricas (*1a*). Ambos lados de la ola tienen la misma pendiente, y crestas y depresiones se propagan a la misma velocidad. En el seno de cada ola, la trayectoria de una "partícula", o pequeño volumen de agua, es circular (*1b*). Por ello, aunque la ola transporta energía, no hay desplazamiento real de agua hacia delante con el paso de la ola. Al entrar en el estuario, las olas empiezan a interactuar con el fondo ascendente y avanzan como ondas de agua somera. La interacción "comprime" las ondas y acorta su longitud de onda. Dado que las crestas tienen más profundidad que las depresiones, avanzan más deprisa y las atrapan (*2a*). Las ondas se hacen asimétricas, la falda delantera se empina más que la trasera. Además, la trayectoria de las partículas de agua en la ola se aplana en una elipse (*2b*). Cuando la altura de la ola supera la mitad de la profundidad, la cresta rebasa la depresión y rompe (*3a*). El trayecto de la partícula de agua ha quedado más aplanado (*3b*). Cuando la ola rompe, forma un macareo: muro turbulento de agua (*4a*). La trayectoria de la partícula pasa a ser lineal hacia la orilla (*4b*).











NUMERO DE FROUDE, que proporciona valiosa información sobre la configuración y fuerza de un resalto hidráulico, entre los que se cuenta el macareo de marea. Designado *F*, su nombre procede de William Froude, ingeniero civil británico del siglo XIX que investigó los resaltos hidráulicos. *F* es el cociente entre la velocidad del macareo y la velocidad de las ondas de agua somera en la parte no perturbada del río que queda frente al macareo. En estos diagramas esquemáticos se presupone que el observador avanza a la misma velocidad y en el mismo sentido que el macareo. Así, en este marco de referencia se elimina el movimiento del macareo río arriba y el flujo global va de izquierda a derecha, mientras que la velocidad disminuye conforme el flujo pasa por el macareo. Si *F* vale entre 1,0 y 1,7, el macareo será ondular. Por encima de 1,7 todos los macareos rompen. De 1,7 a 2,5 se forma un resalto débil. Entre 2,5 y 4,5 se produce un resalto oscilante violento; tales saltos pueden enviar grandes olas río abajo. De 4,5 a 9,0 se forma un resalto estable; es este el tipo de macareo mejor definido. Si *F* supera ese valor de 9 suelen proyectarse grandes chorros de agua hacia delante, más allá del macareo que va avanzando.

portantes aplicaciones en teoría de las mallas cristalinas, óptica no lineal, física de partículas y biología molecular, entre otras disciplinas.

Como hemos visto, la velocidad de la partícula de agua y la velocidad de la onda pueden relacionarse de varias maneras. Cuando la velocidad de flujo de la partícula es menor que la velocidad de onda de agua somera de la ola, se dice que el flujo es subcrítico; cuando la velocidad de la partícula es mayor, el flujo es supercrítico. La transición entre un flujo y otro es el resalto hidráulico; un macareo de marea es un resalto hidráulico que sube río arriba. Al entrar la marea en el estuario las partículas de agua empiezan a avanzar; donde las partículas adquieren la velocidad de ola de agua somera se forma el macareo.

Los resaltos hidráulicos son comunes, si bien rara vez revisten una forma tan espectacular como la de un macareo de marea. Por ejemplo, cuando el chorro de agua de un grifo choca con la superficie de una pila grande, se extiende una capa somera de agua hasta alcanzar un radio determinado, momento en que asciende en un muro circular de agua. Fuera del muro, el agua es más profunda que en su interior.

El muro circular de agua es un resalto hidráulico. Es consecuencia de que la columna de agua, al chocar con la superficie de la pila, se propaga a velocidad decreciente. La profundidad del agua que se extiende desde la base del chorro es pequeña, por cuya razón las ondas de agua somera generadas por movimientos fortuitos del agua de la columna se propagan con lentitud; ciertamente, la velocidad de onda de agua somera es mucho menor que la del flujo. El flujo es, por consiguiente, supercrítico y las ondas se ven arrastradas hacia fuera con el agua que fluye. A mayor distancia de la columna, el agua se frena y el flujo se hace subcrítico. La transición entre las dos regiones es el resalto hidráulico. La región elevada que queda tras el resalto corresponde a la acumulación de ondas que se propagan hacia dentro con una velocidad igual a la del agua que fluye y, por eso, no son arrastradas.

Como hemos visto, la formación del resalto hidráulico que constituye un macareo de marea exige una gran marea y un estuario de configuración adecuada. Además, la marea y el estuario deben guardar entre sí una relación adecuada. Esta relación puede explicarse del modo siguiente. Al subir, la marea entra y cubre lo que era terreno al descubierto. El nivel de la marea

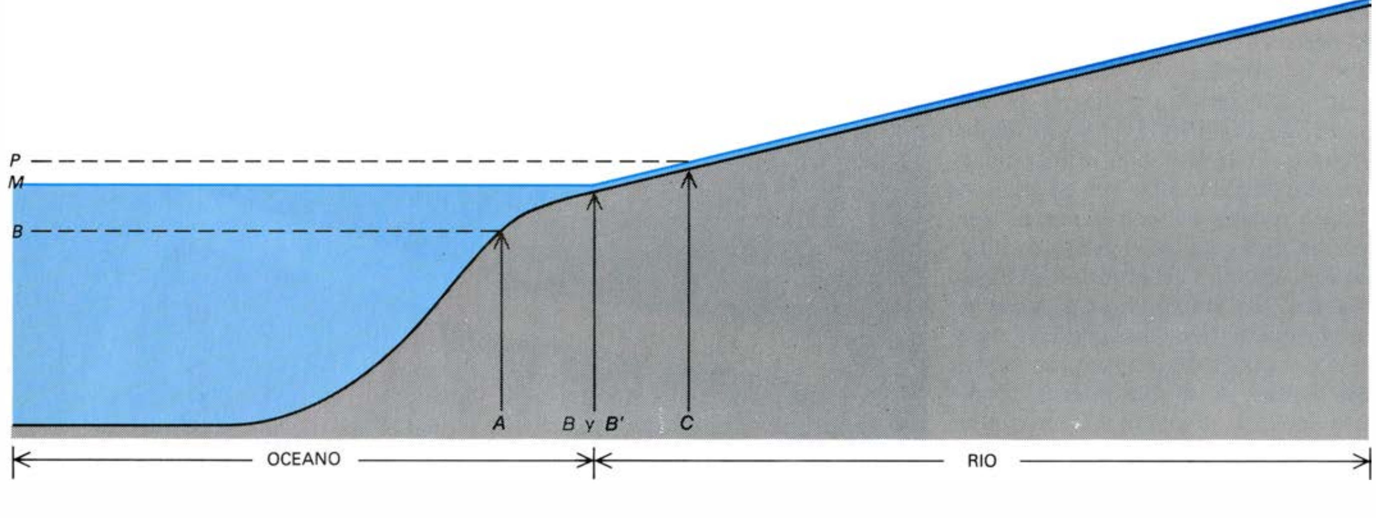
puede extenderse horizontalmente hacia dentro hasta el punto en que intercepta la superficie del río. El punto de intersección penetra conforme sube la marea. En la mayoría de los estuarios, el punto de intersección avanza relativamente despacio y las olas de la marea pueden propagarse con la misma rapidez con que penetra el punto de intersección. En tales estuarios no se forma macareo. Sin embargo, en algunos casos el estuario tiene una pendiente gradual y el punto de intersección avanza más deprisa de lo que pueden propagarse las olas de marea. Cuando la velocidad de las ondas de agua somera de la marea queda por debajo de la velocidad del punto de intersección, la marea desborda el nivel del río y forma un macareo.

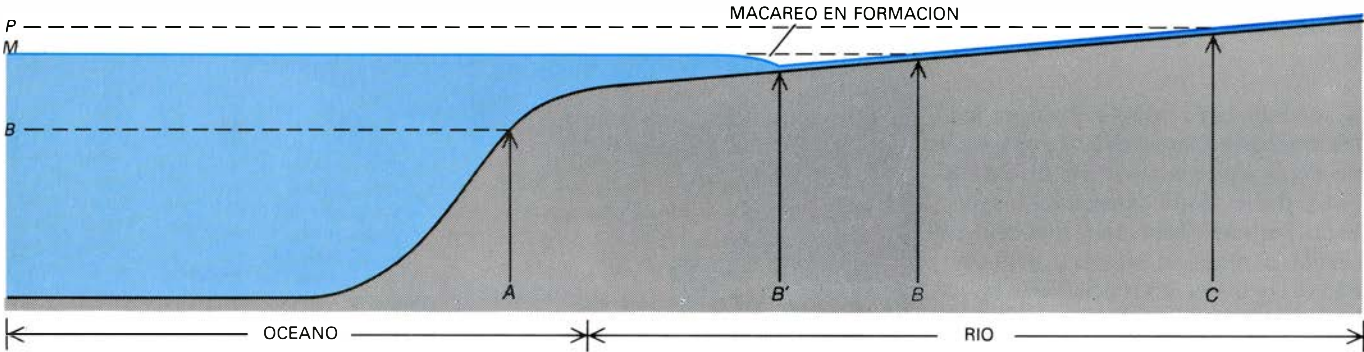
A medida que remonta el río, el macareo de marea debe propagarse más deprisa que la corriente fluvial; de lo contrario sería arrastrado aguas abajo. Para un observador que esté en la orilla, el macareo avanza con una velocidad igual a la diferencia entre la velocidad de propagación del salto hidráulico y la velocidad del río.

La forma y la dinámica del macareo de marea, sin embargo, no resultan afectadas por la velocidad del río. En realidad, la forma más conveniente de estudiar el macareo es sobre un sistema de coordenadas que se desplaza a la misma velocidad que el macareo, de modo que éste parezca estacionario. En un sistema de este tipo el macareo puede describirse por medio del número de Froude (F), nombre que recibe del ingeniero civil británico del siglo XIX William Froude. El número de Froude es la raíz cuadrada del cociente entre la energía cinética del agua en movimiento y la energía gravitatoria de las olas. Si F es menor que 1, el flujo es subcrítico; si es mayor, supercrítico.

Resulta que el número de Froude es igual al cociente entre la velocidad de las olas tras el macareo y la velocidad de las olas en la parte no perturbada del río que queda frente a aquél. Este hecho brinda un método sencillo para calcular F cuando la altura del macareo es mucho menor que la profundidad del río. Dado que la velocidad de las olas a cada lado del macareo es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del agua, F es igual a la raíz cuadrada del cociente entre las dos profundidades, la anterior y la posterior al macareo.

El número de Froude es una descripción condensada de la apariencia y la forma de un macareo de marea. Cuando F oscila entre 1,0 y 1,7, resulta un





SECCIONES TOPOGRAFICAS de la cuenca de marea y desembocadura fluvial en dos tipos de estuario. Explican por qué los macareos se forman en unos ríos sí y en otros no. Para que surja un macareo, debe haber una marea considerable y un estuario con una pendiente suave. Los diagramas muestran la razón de ello. Tanto en el panel superior como en el inferior, *P* indica el nivel de pleamar, *B* el nivel de bajamar y *M* el nivel de la marea normal. La pendiente del lecho del río determina que la marea baja intercepte el río en *A*; la marea alta lo hace en *C*. La marea normal interceptaría el río en *B* si el nivel de marea en la cuenca se extrapolara tierra adentro. *B'* es el punto hasta donde se extiende realmente la marea normal. La velocidad de penetración del punto de intersección *B* tierra adentro depende de la pendiente del estuario y de la velocidad con la que sube la marea. La extensión real de la marea hacia dentro (*B'*) está limitada por la velocidad de las ondas de agua somera que transportan la marea. En la mayoría de ríos (*arriba*) la marea sube lentamente y el estuario es abrupto; el punto de intersección se traslada lentamente y la marea no se rezaga. Por tanto, *B* y *B'* coinciden en el mismo punto. En cambio, si la marea asciende rápidamente, y si el estuario tiene una pendiente suave, como ocurre en algunos ríos (*abajo*), el punto de intersección avanzará tierra adentro más deprisa de lo que pueden hacerlo las ondas de agua somera de la marea. Por eso *B'* queda rezagado tras *B*, y se produce el macareo.

macareo ondular; la marea creciente avanza suavemente río arriba. Unicamente en los bajos próximos a la orilla del río, donde F es mayor, el macareo rompe. Cuando F es mayor de 1,7, todos los macareos son rompientes. Entre 1,7 y 2,5 el macareo se llama resalto débil; pequeños tirabuzones resbalan del borde delantero; detrás del macareo el agua está lisa. Entre 2,5 y 4,5 el resalto se califica de oscilante; un chorro vertical oscila entre el fondo del río y la superficie y genera olas superficiales de gran amplitud. Entre 4,5 y 9,0 el resalto se llama estable; el borde delantero es turbulento, pero la superficie del borde trasero puede ser lisa. Por encima de 9,0 se dice que el resalto es fuerte; su energía se disipa rápidamente y el macareo avanza río arriba a revolcones y sacudidas irregulares, y chorros de gran velocidad se adelantan al cuerpo principal del resalto.

Una propiedad común de los macareos de marea es que su frente no es ni recto ni uniforme. Algunas partes del frente de la ola quedan rezagadas de la ola principal, mientras que otras se le adelantan. La causa de la variación es el cambio en la profundidad del río de un margen al otro. Las partes de la ola que quedan en agua más profunda se propagan más deprisa y tienen un número de Froude menor. De ahí que sea frecuente observar como una ola ondular baja precede a los macareos. Allí donde exista un punto somero local cerca de la orilla, el macareo será más alto y hasta rompiente.

Si los macareos son ondas sin dispersión, ¿cómo se desvanecen? Dos mecanismos restan energía al macareo conforme éste remonta el río. Uno es la fricción entre el agua y el fondo; tal rozamiento convierte en calor la energía cinética del agua en movimiento. El otro es la viscosidad, muy parecido al rozamiento entre moléculas adyacentes. En la ola rompiente, la viscosidad transforma la energía de propagación en turbulencia y finalmente en calor. Además, en los ríos que se ensanchan o profundizan aguas arriba el macareo puede desaparecer debido a que se invierte la acción de embudo que lo encrespó. Cuando se disipa suficiente energía, la velocidad del macareo resulta menor que la del río y el macareo es transportado corriente abajo.

Al igual que muchos otros fenómenos naturales, los macareos son vulnerables a la actividad humana. Un fuerte macareo al que llamaban el burro, de hasta 4,5 metros de altura, subía regularmente en otras épocas por el río Colorado. Sin embargo, durante los últimos 15 años, el control del agua para el riego y el aterramiento han modificado la desembocadura del río. Hoy, el macareo apenas pasa de ser una simple rizadura perdida entre las demás olas fluviales. De vez en cuando, todavía se presenta el burro; otros macareos se han perdido para siempre. Con todo, el hermoso espectáculo de un macareo de marea remontando la corriente puede contemplarse aún en muchos lugares.

Así se funda una colmena

En la mayor parte de la zona templada, las nuevas colonias de abejas deben hallar un refugio abrigado donde protegerse de los rigores del invierno. Las exploradoras más avezadas llevan a cabo esa búsqueda con notable precisión

Thomas D. Seeley

Las abejas aparecieron en los trópicos. Y allí siguen todavía dos especies de las cuatro que persisten: *Apis florea* y *Apis dorsata*. Las otras dos, *A. cerana* y *A. mellifera*, se propagaron gradualmente hacia el norte y hacia el sur del ecuador. Hubieron, pues, de hacer frente a los problemas que les planteaba el invierno, sin néctar ni polen de que alimentarse, amén del que presentaba la propia temperatura, mantenida días y semanas enteros por debajo del nivel apto para su vuelo: 10 grados Celsius. El método que las abejas han desarrollado para sobrevivir al invierno se funda en el tipo de habitáculo donde se instale la colonia. Si se ha escogido con acierto, la colonia vivirá años; si no, las abejas pueden caer en la primera estación fría. La idoneidad del recinto depende de la habilidad que muestren un grupo sucinto de viejas obreras a cuyo cargo corre la elección: las exploradoras.

En los trópicos, *A. florea* y *A. dorsata* anidan en espacios abiertos, colgando sus colmenas en el dorso de las ramas. *A. cerana* y *A. mellifera*, por su parte, se abrigan en cavidades. Ni que decir tiene que este hábito les ha valido para propagarse hacia las zonas templadas. Allí cobijadas llegan a almacenar, durante los meses no invernales, hasta 10 kilos largos de miel, que les servirán de comida, e indirectamente de fuente de calor, cuando el frío apriete. En invierno, la colonia forma un denso racimo, en cuyo interior las abejas generan calor a través de pequeñas vibraciones de sus poderosos músculos voladores, manteniendo la temperatura superficial del enjambre a unos 10 grados Celsius. Protegidas en un refugio convenientemente abrigado y con suficiente miel almacenada, superan los rigores sin graves problemas.

Vemos, pues, que la elección de un refugio adecuado constituye una de las primeras tareas a acometer por toda nueva colonia que se funde. En la naturaleza, los lugares preferidos son las cavidades de los troncos. He pasado los últimos cinco años estudiando, en la zona central del estado de Nueva York, la conducta desplegada por individuos de la especie *A. mellifera* a la hora de buscar su refugio. Y he llegado a la conclusión de que el proceso de elección del habitáculo de la colmena es perfecto en su minuciosidad y aporta datos de interés práctico para los apicultores.

La localización del emplazamiento forma parte del enjambrazón, método que siguen las abejas a la hora de establecer una nueva colonia. Las abejas enjambran al final de la primavera; las del estado de Nueva York lo hacen entre últimos de mayo y finales de junio. El enjambrazón sigue a un período de intensa reproducción, que aumenta notablemente la población de la colmena y provoca una gran congestión del habitáculo. De acuerdo con el trabajo realizado por James Simpson, de la Estación Experimental de Rothamsted, Inglaterra, tamaña superpoblación sirve de acicate para que empiece la cría de una tanda de reinas hijas. La reina más fuerte (cuestión resuelta por un duelo de aguijones entre las jóvenes reinas) hereda la colmena establecida. Cuando la cría de nuevas reinas se halla muy adelantada, y antes incluso de que nazca la primera reina hija, la madre reina emigra con casi la mitad de la colonia, formada por unas 30.000 obreras. Se dispone así a instalar una nueva colonia en otro refugio.

Arrancando en un vuelo corto, la vieja reina sale en alocado vuelo con su comitiva, como desparramándose de la colmena. Apenas ha recorrido el enjambre unas docenas de metros, se posa en racimo barbiforme sobre algún objeto, que suele ser la rama de un árbol o un arbusto. No transcurrirá mucho tiempo sin que las exploradoras partan, en todas direcciones, a la búsqueda de un nuevo hogar.

Ese vuelo de reconocimiento no se extiende más allá de 10 kilómetros a la redonda. Constituyen el grupo de las exploradoras las abejas más viejas del enjambre, las que recogieron antes alimento para la vieja colmena y se hallan, por tanto, familiarizadas con el territorio inmediato. Suman escasos centenares, en torno al 5 por ciento de la población del enjambre.

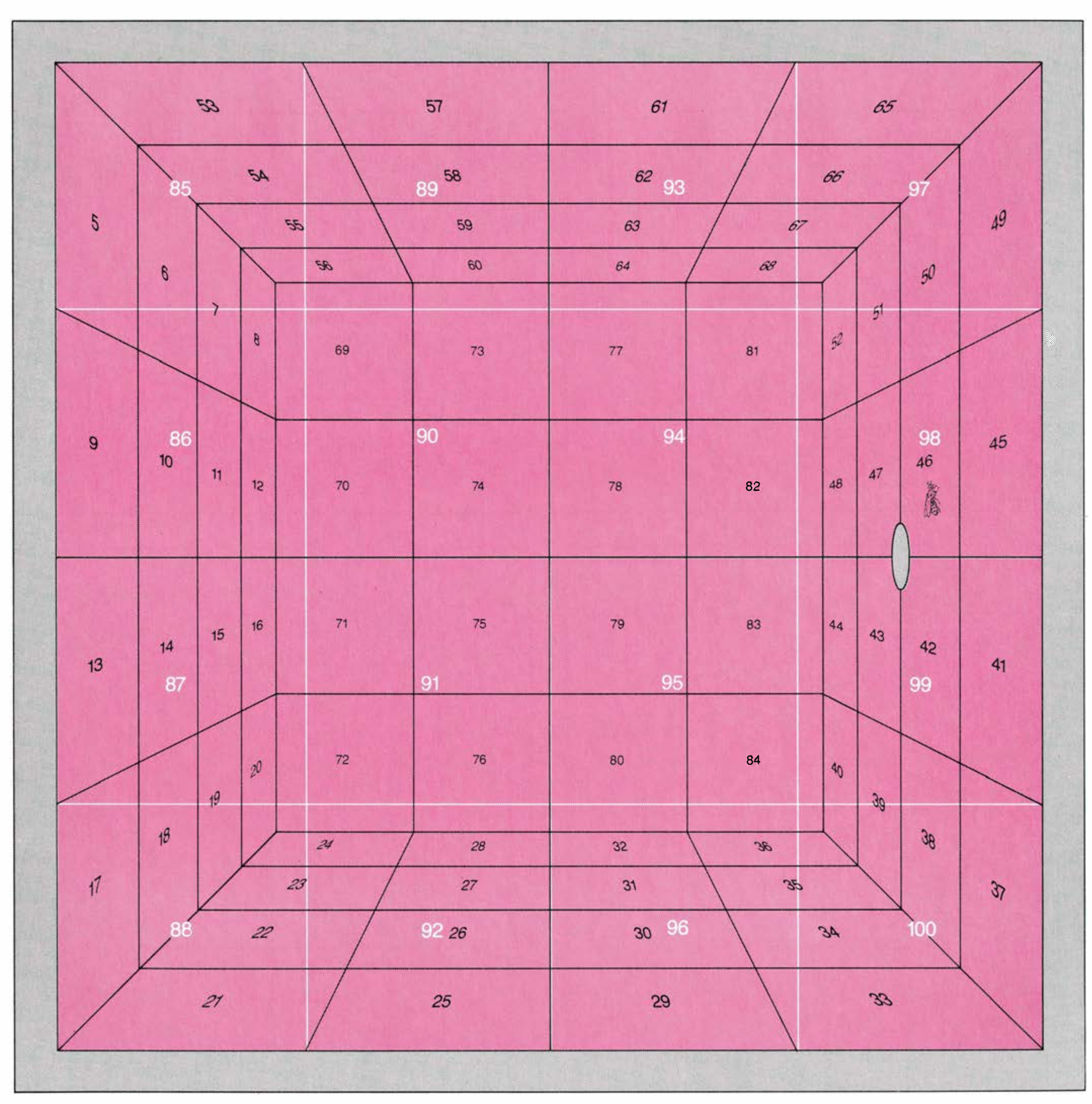
Una vez seleccionado el nuevo emplazamiento de la colmena, corretean en zigzag, de un lado a otro del enjambre, produciendo zumbidos y otros ruidos con las alas; indican así a las demás componentes que pueden romper el racimo. Bernd Heinrich, de la Universidad de Vermont, ha demostrado que, antes de iniciar el vuelo, la masa del enjambre eleva su temperatura hasta unos 36 grados Celsius, temperatura ideal para el funcionamiento óptimo de los músculos alares [véase "Regulación de la temperatura en el enjambre de abejas melíferas", por Bernd Heinrich; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1981]. En los minutos inmediatos al despegue las exploradoras se concentran en torno al enjambre y se abren paso trabajosamente por el racimo, vibrando las alas y perforando la cerrada malla de abejas. Un alborotado murmullo emana del racimo, mezcla de zumbidos profundos y agudos sonidos silbantes. El sonido alcanza el clímax cuando la sólida superficie del enjambre parece fundirse y las cadenas de abejas comienzan a deshacerse. De inmediato, el enjambre entero inicia el vuelo, llenando el aire de un zumbido penetrante provocado por miles de abejas en apretada formación.

El enjambre forma en su vuelo como una nube de 10 metros de diámetro. Para conducir a sus hermanas hacia el nuevo hogar, las exploradoras intersecan el enjambre marcando líneas que apuntan hacia la dirección del sitio elegido. El enjambre avanza al principio con cierta lentitud, recorriendo los

treinta primeros metros a una velocidad inferior al kilómetro por hora; pero cuando llevan unos doscientos aceleran hasta los 10 kilómetros o más por hora, en un vuelo a unos cuantos metros por encima del tapiz vegetal.

Cuando el enjambre se va acercando al punto escogido para la futura colmena, las exploradoras indican que se detenga. Van cayendo entonces las abejas de la nube y se posan en la entrada del habitáculo (un agujero junto a un nudo del tronco, un hueco entre las raíces o una grieta en una rama). Liberan allí una feromona de congregación segregada por la glándula de Nassanoff, situada en la parte inferior del abdomen. La feromona, señal química detectada por las abejas como un olor, marca la entrada de la colmena. Ante su estímulo, las abejas restantes se precipitan en la cavidad en una formación arremolinada. Media hora más tarde, todos los componentes del enjambre están a salvo en su nuevo hogar. Antes de que transcurran muchas horas, se las ve limpiando, construyendo panales y volando para libar néctar y polen. Ha quedado establecida una nueva colonia.

Recién terminada la segunda guerra mundial, Martin Lindauer, de la Universidad de Würzburg, comenzaba sus estudios sobre los enjambres de abejas de Munich, en cuyo Instituto de Zoología trabajaba a la sazón. Analizó el proceso de que se valían las exploradoras para decidir, entre los sitios descubiertos, cuál había de ser el emplazamiento de la colmena. Lo primero que le llamó la atención fue observar que, una vez arracimado el enjambre, cerca de la antigua colmena, las abejas parecían desarrollar "ciertas danzas" en la superficie del racimo, similares a las que, en opinión de Karl von Frisch

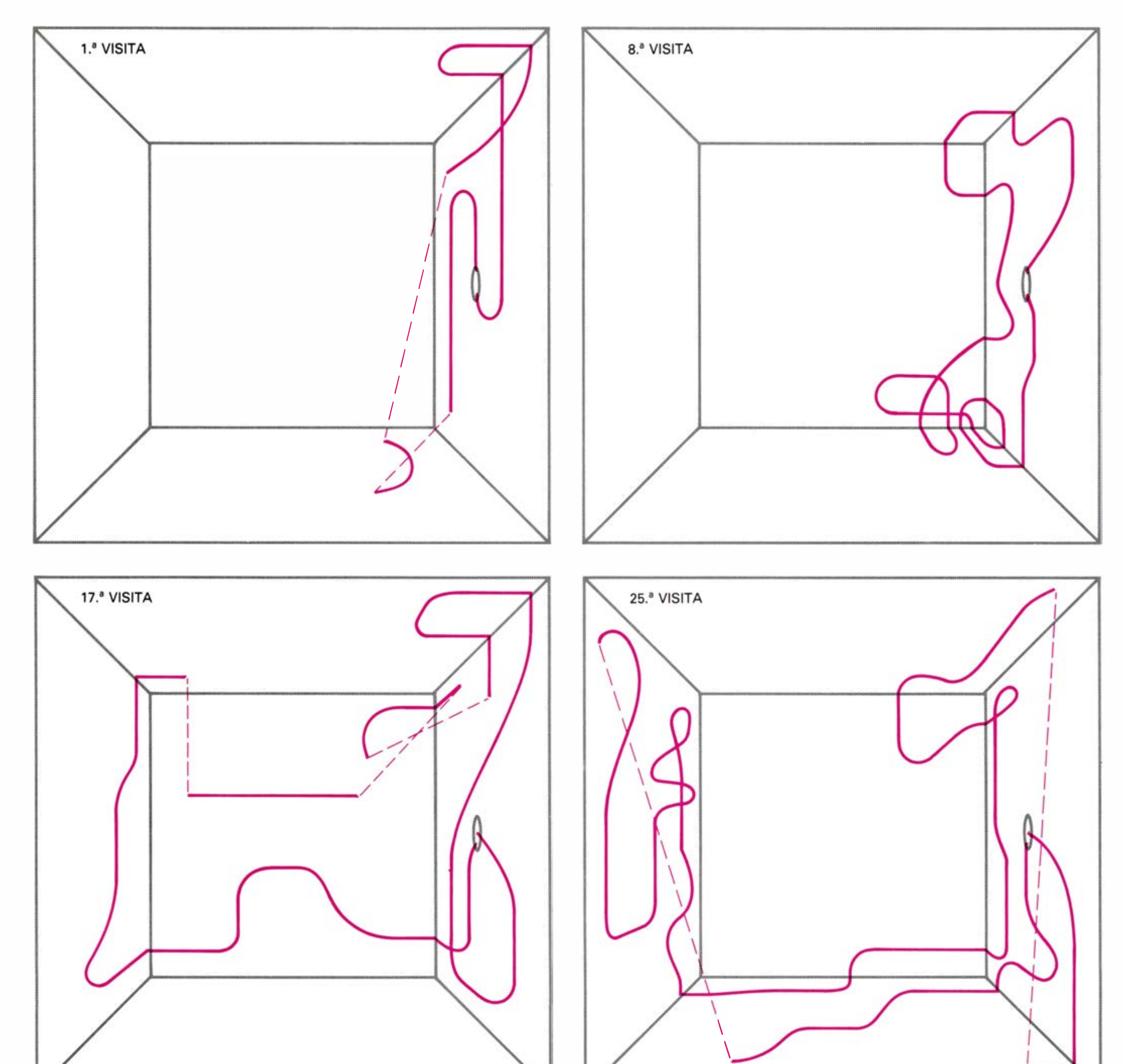


COLMENA EXPERIMENTAL diseñada por el autor; le permitió observar los movimientos de una exploradora girando inspección a un potencial emplazamiento para la colmena. La caja se montó en la parte exterior de una ventana roja de la pared de una cabaña. Las abejas no distinguen la luz roja, de ahí que el investigador pudiera mirar a través de la ventana sin molestar a la abeja y registrar sus movimientos valiéndose de los cuadrados numerados.

(también en el Instituto de Zoología por aquel entonces), practicaban para conducir a sus compañeras hasta nuevas fuentes de alimento.

Observó Lindauer que las bailarinas nunca acarreaban néctar ni polen. Diríase que ellas estaban exentas de libar. Y para asegurarse, las marcó con pautas de color. Leyó en las trayectorias que seguían las danzas el mapa de los puntos indicados. En una investigación posterior midió con una brújula la orientación con respecto al sol y cronometró los ciclos de la danza. La orientación de la danza señalaba la dirección del lugar y, el ritmo, la distancia: más rápido cuanto más cerca se hallaba del punto. En un mapa topográfico marcó los puntos indicados y se aprestó a ubicar el lugar exacto a donde acudían las abejas. Vio en algunos casos los individuos marcados. No se hallaban éstos libando, sino inspeccionando agujeros del suelo, cavidades arbóreas o grietas de muros ruinosos. Pertenecían al grupo de las encargadas de buscar alojamiento para la colmena. Sus danzas no remitían a concentraciones florales, sino a posibles habitáculos.

Siguiendo sin interrupción las danzas de las exploradoras, desde que el enjambre se arracimaba hasta que levantaba el vuelo, Lindauer determinó de qué manera llegaban las exploradoras a ponerse de acuerdo sobre el sitio a optar. Ocurría que cada una investigaba por su cuenta; las que daban con un lugar lo anunciaban danzando junto al enjambre. Algunos lugares merecen una fogosa danza, repetida largo rato;



METODO DE INSPECCION empleado por las exploradoras para evaluar una cavidad. Se deduce de los trazos que resiguen los trayectos efectuados por una misma exploradora en cuatro de las 25 visitas que giró en el transcurso de la fase inicial de inspección a un emplazamiento potencial para la colmena. La línea continua indica que la abeja caminaba; la línea a trazos, que volaba. Primero limita el insecto su visita a los aledaños de la entrada, aunque acaba por explorar la totalidad de la cavidad. Tras la inspección inicial, vuelve esporádicamente a visitar el refugio, según parece, después de algún cambio en las condiciones externas. Aprovecha los períodos de ausencia para comunicar su hallazgo a los demás miembros de la colonia, por medio de una "danza" estereotipada que baila sobre la superficie del enjambre (racimo que componen las abejas), o para visitar habitáculos descubiertos por otras exploradoras.

otros, unos movimientos que cualquier observador juzgaría faltos de entusiasmo. La viveza de la danza matiza la calidad del sitio descubierto. Si éste no es muy bueno, los movimientos serán lentos e indolentes.

Si una exploradora que baila sin mayor interés se encuentra con otra que lo hace con vigor, capta el mensaje y corre ella a inspeccionar el lugar señalado. Y si entiende que efectivamente se trata de un cobijo mejor que el suyo, pasa a advertírselo –a través de los movimientos adecuados– al enjambre. Así es como las exploradoras afinan su acuerdo respecto a cuál sea el mejor asentamiento para la colmena. Coincidencia de pareceres que se manifiesta señalando, todas al unísono, el mismo objetivo, lo que determina que el enjambre rompa la formación en racimo y vuele hacia la nueva colmena.

El trabajo de Lindauer desvelaba lo que sucedía en el enjambre arracimado mientras las exploradoras cumplían su misión inspectora, pero apenas descubría qué ocurría en los sitios de prospección. ¿Qué entienden las abejas exploradoras por alojamiento ideal? ¿Cómo inspeccionan un potencial habitáculo y sopesan sus características? Tras repetir los ensayos de Lindauer sobre la forma en que llegaban las exploradoras a un acuerdo y lo transmitían al enjambre, decidí abordar las posibles respuestas a esas cuestiones y en esa investigación empeñé mi tesis de doctorado por la Universidad de Harvard.

Un punto de partida lógico para desentrañar qué esperan encontrar las exploradoras en el sitio donde fijarán su morada es estudiar la situación de las colmenas en la naturaleza. Cada colonia ocupa el lugar escogido por la avanzadilla. Parece razonable, pues, esperar que tales sitios nos ayuden a precisar lo que prefieren las abejas. Trabajando con Roger A. Morse, de la Universidad de Cornell, encontré 21 colonias de abejas en cavidades de árboles de los bosques que rodean Ithaca, Nueva York.

Para conocer en todos sus detalles la arquitectura interna de estas colmenas naturales talamos los árboles y transportamos al laboratorio la sección que contenía el habitáculo. Una vez allí, la rajamos cuidadosamente para extraer la colmena. Medimos cuanto nos pareció de interés para las abejas: altura y anchura de la entrada y forma y volumen de la cavidad (medida obtenida sacando los paneles y llenando el hueco de arena). Obtuvimos datos concluyentes: una colmena típica ocupa un aguje-



ENJAMBRE DE ABEJAS colgado de la rama de un árbol. Un enjambre está integrado por la reina de una colonia establecida y la mitad de sus abejas, es decir, por unas 15.000 obreras. Tras abandonar la colmena, el grupo se dispone de esta forma y las exploradoras (unos centenares de las abejas más viejas) vuelan en busca de un nuevo emplazamiento. No suelen alejarse de la antigua colmena más de 10 km.



ENJAMBRE EN VUELO hacia la nueva colmena, elegida por acuerdo entre las exploradoras a las horas o días, tal vez, de búsqueda. El enjambre avanza de izquierda a derecha. La mayoría de las abejas, que aparecen como puntos o cortas rayas, vuelan despacio. Las exploradoras lo hacen con celeridad entremedio del enjambre, señalando la dirección del nuevo emplazamiento; aparecen como líneas largas.



COLMENA NATURAL DE ABEJAS constituida en un árbol hueco. Se ha seccionado la porción de tronco donde se ubicaba para mostrar los panales que contienen larvas y miel. Se aprecia el agujero de entrada en la parte izquierda, más o menos a dos tercios de la altura de la cavidad. El autor y Roger A. Morse, de Cornell, examinaron muchas colmenas para determinar las preferencias de sus integrantes.

ro de árbol alargado en vertical con un volumen de unos 45 litros.

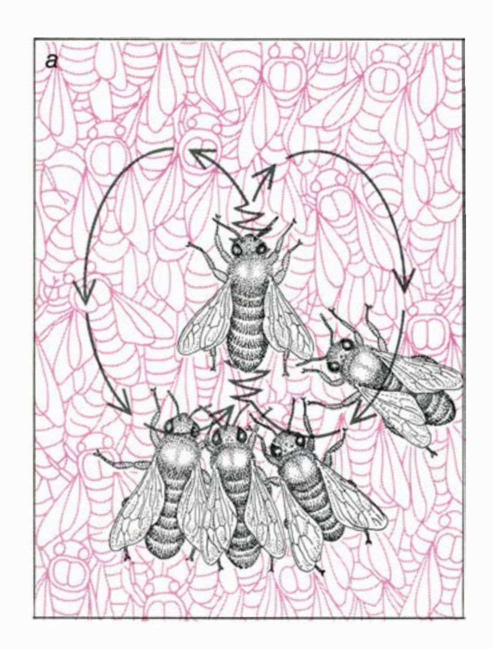
Sabiendo ya cómo eran los habitáculos naturales de las abejas, decidí comprobar si las características que habíamos observado reflejaban las preferencias de las exploradoras y su modo de orientar la búsqueda. La idea para el diseño experimental de la comprobación la saqué de mis lecturas sobre la apicultura en Africa oriental. Para hacerse con un enjambre, los criadores cuelgan de los árboles colmenas artificiales (troncos huecos cerrados por los extremos, con una abertura de entrada) y aguardan que las abejas los ocupen.

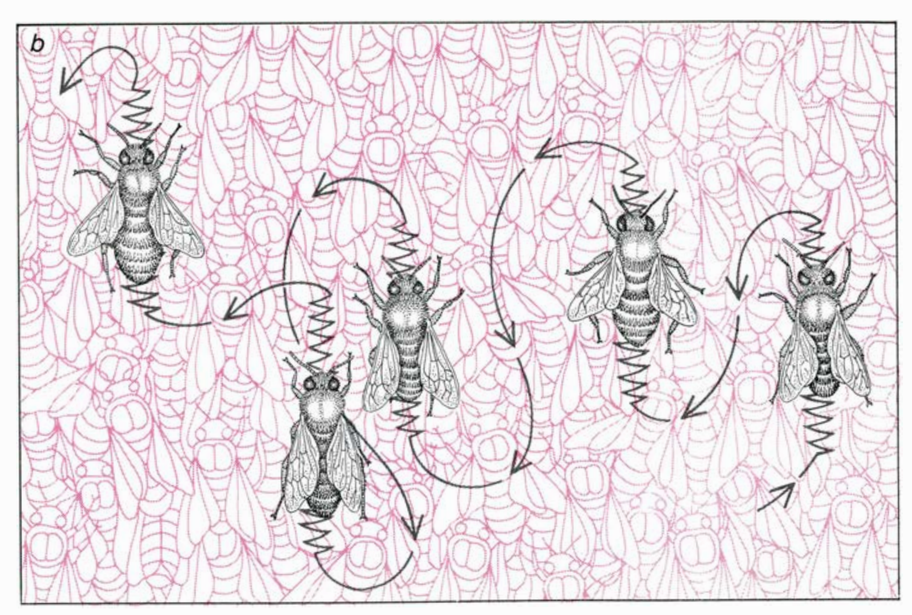
Eso intenté en los alrededores de Ithaca, con la diferencia de que yo las dispuse en grupos de dos o tres. En cada grupo, las cajas eran iguales en todo salvo en una característica, verbigracia, el volumen de la cavidad o el tamaño del orificio de entrada. Esperaba que las exploradoras de los enjambres salvajes descubrieran mis colmenas artificiales y revelaran sus preferencias eligiendo entre las cajas de cada grupo.

El plan funcionó bastante bien. Durante cuatro veranos, la mitad aproximada de mis habitáculos artificiales atrajeron un enjambre cada estío. Más todavía: las pautas de ocupación eran lo suficientemente coherentes para mostrar las preferencias de las abejas. Aunque la obtención de datos estadísticamente significativos requería varias ocupaciones de cajas colmena por cada variable. Para comprobar las preferencias sobre 11 variables, construí 276 colmenas artificiales, utilizando contrachapado de madera (más de setenta tableros) que podrían haber servido en levantar una casa unifamiliar.

Las abejas mostraron preferencias ante las siguientes variables: volumen de la cavidad, tamaño de la abertura de entrada, altura de la entrada sobre el suelo, altura de la entrada sobre la parte inferior de la colmena, orientación de la entrada y presencia de panales en la cavidad. Evitaron huecos con un volumen inferior a 10 litros o superior a 100. Una cavidad angosta no proporciona espacio suficiente para el almacenamiento de la miel que la colmena necesitará para pasar el invierno; otra demasiado grande resulta difícil de calentar en los meses fríos.

Las abejas escogían la entrada que no superara los 50 centímetros cuadrados, situada por lo menos a dos metros sobre el nivel del suelo, orientada al sur y abierta en la parte inferior de la cavidad. Una entrada pequeña se guarda mejor y ayuda a aislarse del exterior.

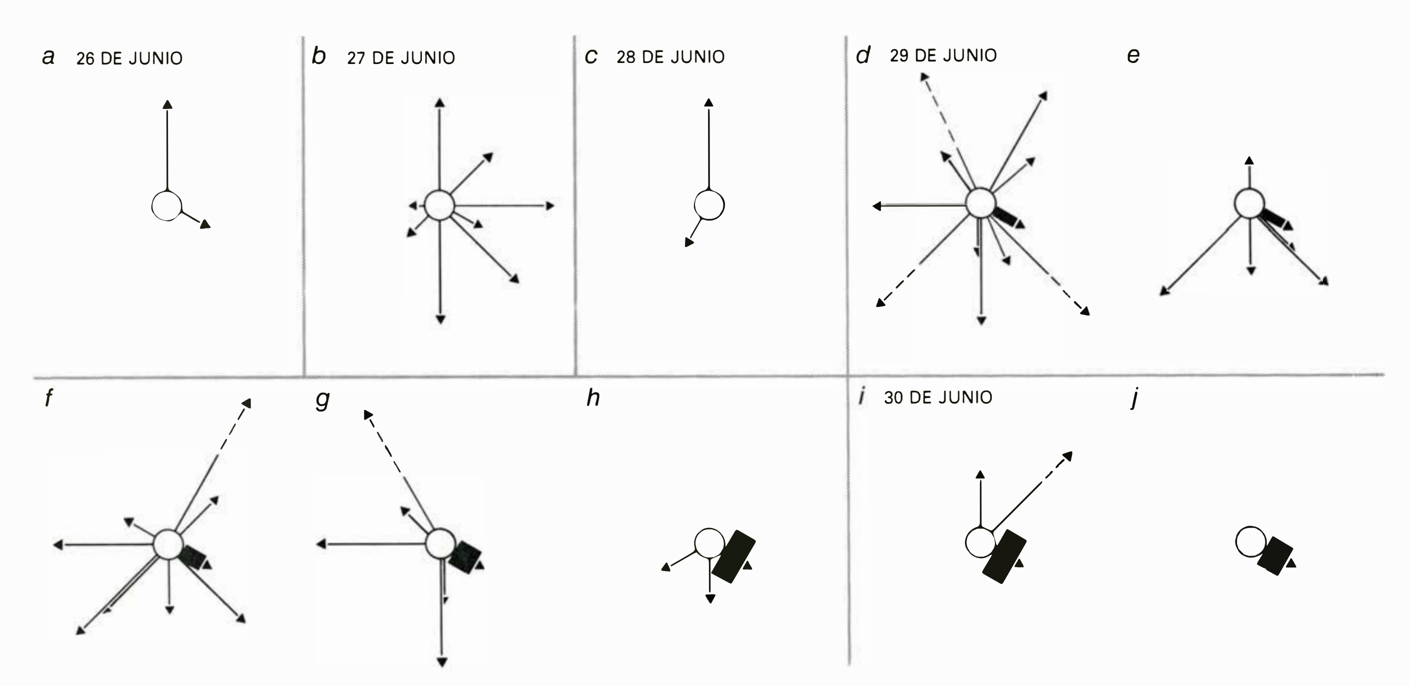




DANZA DE UNA EXPLORADORA anunciando que ha encontrado un emplazamiento para la colmena. La realiza sobre la superficie del enjambre. La bailarina suele dibujar una figura con forma de 8 (*a*) contoneando el abdomen en la parte central del trayecto. La dirección del recorrido acompañado de contoneo señala la dirección del emplazamiento en relación al sol. Aquí el recorrido es ascendente, y significa que el refugio se halla camino del sol. El ritmo de la danza revela la distancia del lugar: cuanto más alejado, más largo es el contoneo de la parte central de la danza. Se aprecian otras cuatro exploradoras atentas a la danza. A veces, una exploradora baila en un sitio, avanza un breve trecho de la superficie del enjambre y repite sus movimientos (*b*).

Las aberturas en lo alto resultan inaccesibles a los depredadores que no pueden volar o trepar los árboles y cuesta descubrirlas más que las cercanas al suelo. La orientación al sur proporciona calor y una soleada percha desde donde las libadoras pueden despegar y aterrizar. (Los apicultores orientan sus colmenas artificiales al sur para ayudar a sus abejas a levantar el vuelo en los días fríos. La orientación reviste particular interés en los meses invernales, cuando salen en días soleados para eliminar desechos orgánicos.) Una entrada en la parte baja de la cavidad minimiza la pérdida de calor del habitáculo por corrientes de convección. La preferencia por un acomodo casi lleno de panales (construidos por una colonia precedente que no pudo soportar el invierno) representa sin duda un tremendo ahorro de energía, que de otro modo habría que invertir en su construcción.

Las propiedades por las que no detecté preferencia fueron: forma de entrada y de la cavidad, presencia o au-



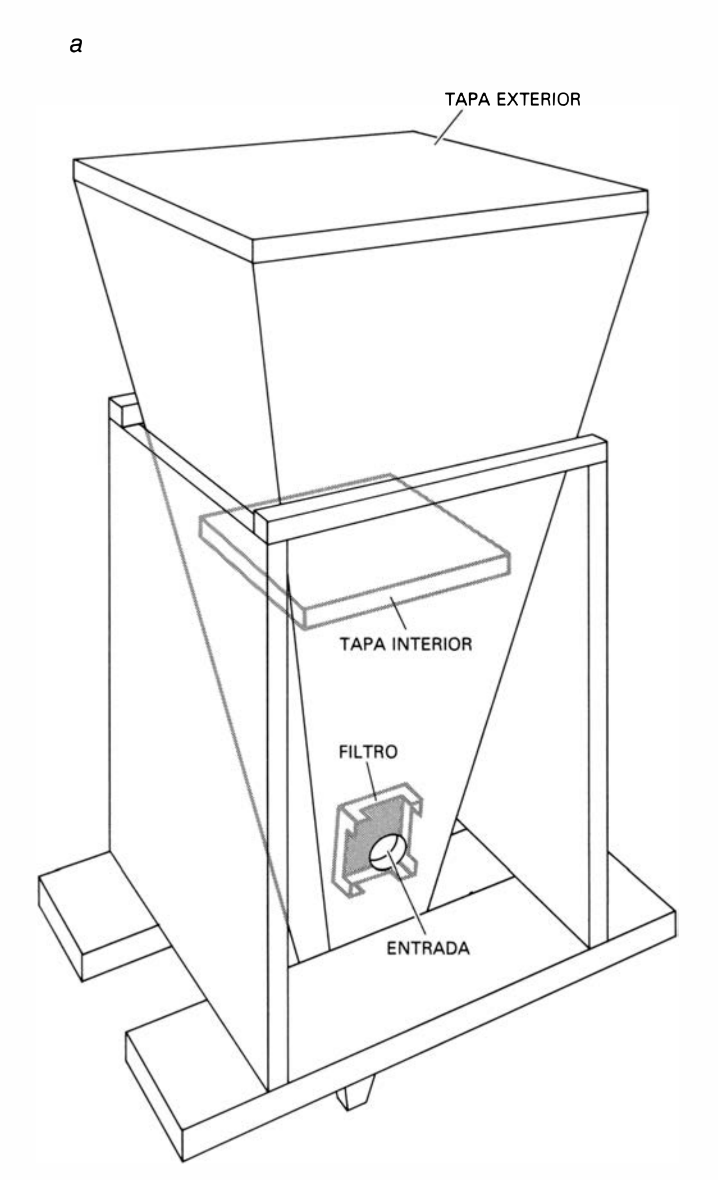
RESUMEN DE LAS EXPLORACIONES efectuadas desde que una nueva colonia dejó la antigua colmena (a las 13.35 del 26 de junio) hasta que se trasladó al nuevo emplazamiento (a las 9.40 del 30 de junio). Las observaciones fueron hechas por Martin Lindauer, de la Universidad de Würzburg. En cada caso, el círculo representa la ubicación del enjambre; las flechas indican las direcciones en las que las exploradoras encontraron lugares potenciales, y su grosor, el número de exploradoras que visitaron un determinado lugar. La longitud de una flecha refleja la distancia: si ésta es superior a 1000 metros se representa por una línea a trazos. El refugio más lejano (*f*) distaba 3500 metros. Las exploradoras descubrieron 21 sitios potenciales, pero llegaron gradualmente a un acuerdo sobre uno situado 300 metros al sureste; el sitio había sido encontrado por una de las dos primeras abejas que anunciaron un hallazgo (*a*). El 28 de junio se redujo la actividad a causa de la lluvia. Los esquemas del 29 y el 30 de junio corresponden a varios períodos de observación.

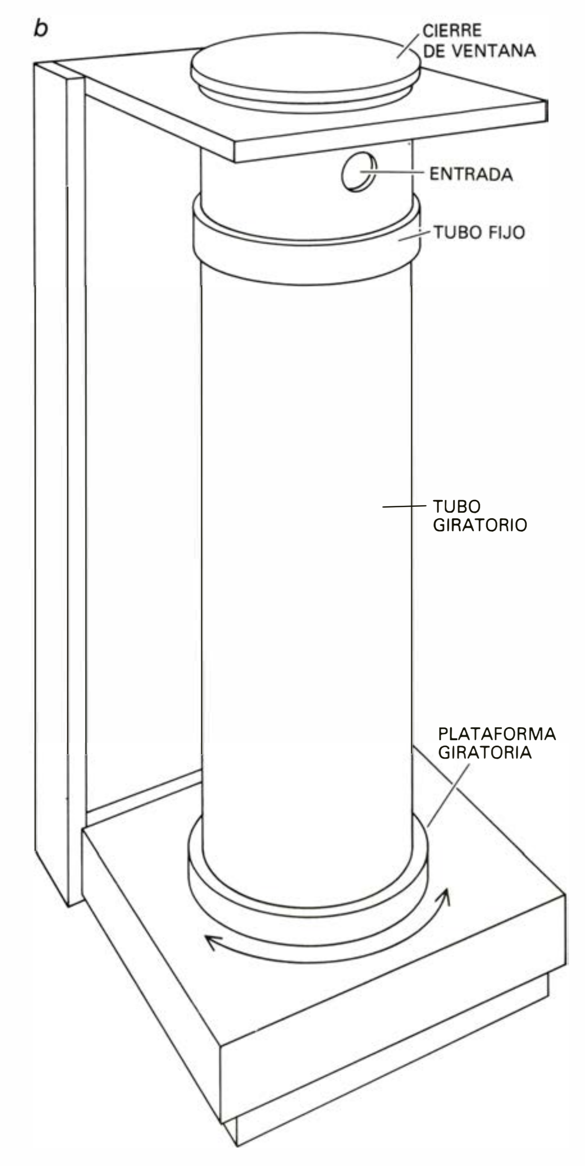
sencia de corrientes de aire, humedad y distancia de la antigua colmena. Las abejas desean, quizás, estancias sin corrientes de aire y colmenas secas; ahora bien, como la colonia puede taponar con resinas las grietas que ocasionan las corrientes de aire y la humedad, las exploradoras no parecen conceder demasiada importancia a esos factores. Lo que no pueden modificar es el volumen de la cavidad, el tamaño de la entrada y la orientación, de ahí que deban atender a esas características a la hora del asentamiento.

Su capacidad acomodadora de lugares húmedos o con corrientes de aire quedó probada en colonias que ocuparon nuestras cajas experimentales. Con objeto de provocar corrientes de aire practiqué en las paredes de algunas cajas una parrilla de pequeñas perforaciones de seis milímetros de diámetro separadas entre sí 10 centímetros. Las abejas habían taponado todos los agujeros con resina de árbol pocos días después de haberse instalado. También secaron con diligencia las cajas húmedas: vaciaron el aserrín mojado que puse en el suelo, sellaron la grieta rezumante de la pared y la impermeabilizaron con resina.

Al realizar estos estudios sólo pretendía satisfacer mi curiosidad por cómo elegían las abejas un nuevo hogar en cuanto se las dejaba a sus anchas, pero la investigación proporcionó información de especial valor para los apicultores. Aplicando los nuevos datos sobre las preferencias de las abejas a la hora de establecerse en un determinado habitáculo, Morse y yo diseñamos un tipo de refugio que bautizamos colmena-cebo; se trataba de una colmena artificial para la captura de enjambres de abejas salvajes. Venía a ser una caja clavada a un árbol, cuyo tamaño, características de la entrada y altura sobre el nivel del suelo se correspondían con las preferencias de las abejas. Un lugar ideal. (No llenamos las colmenas-cebo con panales por temor a transmitir alguna enfermedad a las nuevas inquilinas.)

De 1975 a 1980 recogimos en nuestro diseño el equivalente a 251 años de datos por colmena-cebo; en el proceso capturamos 124 enjambres, lo que daba una tasa de ocupación de un 49 por ciento anual. Hasta entonces, los api-





APARATO EXPERIMENTAL proyectado por el autor para comprobar cómo mide una exploradora el volumen de una cavidad. La colonia precisa un lugar con un volumen mínimo de 15 litros, capacidad que permite almacenar los 10 kilogramos de miel necesarios para pasar el invierno. Suelen desecharse las cavidades cuyo volumen supere los 100 litros, debido quizás a las dificultades que tendría en ese caso la colonia para mantener la temperatura mínima necesaria para sobrevivir a la estación fría. En uno de los aparatos (*a*), el investigador podía variar el volumen entre cinco litros (con la tapa interior abajo) y 25 litros (con la tapa interior arriba). Un filtro modificaba la cantidad de luz que penetraba a través del orificio de entrada; lo que facultaba para averiguar si las exploradoras estimaban el volumen de la cavidad confiando principalmente en el trayecto recorrido, como así se confirmó, o en lo que veían. En el otro aparato (*b*), que tenía un volumen de 14 litros, el investigador giraba la pared para aumentar o disminuir el trayecto recorrido por una exploradora que medía el volumen caminando. El número de exploradoras reclutadas por la abeja era la medida de su estimación del volumen.

cultores que querían recolectar enjambres salvajes tenían que esperar que un enjambre se posara en algún sitio y apresurarse a recogerlo en una colmena artificial antes de que las abejas eligieran el habitáculo adecuado y se mudaran a él. Las colmenas-cebo permiten que los apicultores los recojan automáticamente.

Hasta ese momento había tratado el proceso de evaluación de la ubicación de una colmena cual si fuera una misteriosa caja negra. Sabía qué buscaban las exploradoras, pero carecía de información suficiente sobre cómo inspeccionaban el lugar. Para observar esa estrategia tuve que dejar el área de Ithaca y trasladar mi investigación a Appledore Island, en Maine. Esta isla de 39 hectáreas dista 10 kilómetros de la costa y es la sede del Shoals Marine Laboratory, de Cornell y de la Universidad de New Hampshire. Su particular interés para mi trabajo radicaba en que no había allí árboles gruesos y huecos. Así pues, cuando liberé mis enjambres en la isla, les obligué a concentrar su búsqueda de habitáculo en las colmenas experimentales que había dispuesto, lo que me permitió observar y analizar fácilmente el proceso de evaluación del lugar donde establecer una colmena.

Mi primer objetivo en Appledore Island fue registrar la conducta de las abejas exploradoras cuando inspeccionaban las ubicaciones para las colmenas. Esperaba que las observaciones revelaran el procedimiento de evaluación de las propiedades críticas de la sede de la colmena. De especial importancia era observar, desde dentro, las prospecciones de las exploradoras, lo que explicaría cómo juzgan el volumen de la cavidad o el tamaño de la entrada, por ejemplo.

Construí al efecto una cabaña con una caja-colmena de forma cúbica, montada sobre una pared. La caja estaba colocada en el alféizar de una ventana roja (las abejas no perciben la luz roja), que me permitía ver el interior de la caja sin molestar a las exploradoras. La superficie interior de la caja llevaba marcado un sistema de coordenadas que me facilitaba el registro de los desplazamientos de la exploradora mientras se encontraba en la cavidad. Tras montar la cabaña en un extremo de la isla, dispuse un pequeño enjambre (compuesto por unas 2000 abejas) en la costa antípoda, marcando cada abeja con un punto de color que la identificaba individualmente de acuerdo con un código. Luego me retiré a la cabaña y esperé la llegada de abejas exploradoras.

CARACTERISTICAS	PREFERENCIA	FUNCION
ALTURA DE LA ENTRADA	MAS DE TRES METROS	DEFENSA DE LA COLONIA
AREA DE LA ENTRADA	MENOS DE 60 CENTIMETROS CUADRADOS	CONTROL DEL MICROCLIMA DE LA COLMENA Y DEFENSA DE LA COLONIA
POSICION DE LA ENTRADA	PARTE INFERIOR DE LA CAVIDAD	CONTROL DEL MICROCLIMA DE LA COLMENA
DIRECCION DE LA ENTRADA	ORIENTADA HACIA EL SUR	CONTROL DEL MICROCLIMA DE LA COLMENA
VOLUMEN DE LA CAVIDAD	DE 10 A 100 LITROS	ESPACIO PARA ALMACENAMIENTO DE MIEL Y CONTROL DEL MICROCLIMA DE LA COLMENA
PANALES	PANALES EN LA CAVIDAD	ECONOMIA EN LA CONSTRUCCION DE LA COLMENA

CARACTERISTICAS que parecen preferir las abejas para el emplazamiento de una colmena. Se relacionan atendiendo a las cajas-colmena elegidas por ellas. Difícilmente un habitáculo las reunirá todas.

Una abeja exploradora necesita alrededor de 40 minutos para explorar un lugar. El reconocimiento completo es la suma de múltiples incursiones en la cavidad, tardando en cada una por lo menos un minuto, que se alternan con períodos de igual duración en el exterior. A este período inicial, en que la exploradora se encuentra principalmente en el emplazamiento de la futura colmena, entrando y saliendo continuamente de la cavidad, lo llamé fase de descubrimiento.

Tras esta fase, la exploradora continúa visitando el emplazamiento, si es bueno, pero las visitas son ya esporádicas: una por hora y durante menos de un minuto. Diríase que la exploradora lleva a cabo una inspección detallada del posible emplazamiento durante la fase de descubrimiento y luego dedica su tiempo a comunicar el hecho al enjambre o a inspeccionar otros refugios. Los retornos ocasionales les permiten comprobar el emplazamiento bajo distintas condiciones, a última hora del día por ejemplo, cuando ha variado el ángulo solar, o tras una tormenta que pueda haber inundado la oquedad.

Dentro ya de la cavidad, la exploradora invierte la mayor parte de su tiempo (alrededor de un 75 por ciento) en recorrer, rauda, las superficies interiores. Este rápido paseo se combina con breves vuelos, que no suelen durar más allá del segundo, en los cuales va de un sitio para otro. Un patrón geométrico de estas inspecciones revelaría que, al principio de la fase de descubrimiento, la exploradora recorre principalmente las cercanías de la entrada, pero más tarde penetra hasta lo más profundo de la cavidad. Reconstrucciones tridimensionales de los senderos recorridos por las distintas exploradoras indican que, en cada inspección, ha recorrido 50 metros o más por el interior de la oquedad y ha cubierto todas sus superficies internas.

El volumen de la cavidad constituye, quizá, la magnitud más decisiva en lo relativo a la supervivencia de la colonia: necesita ésta por lo menos 10 kilogramos de miel para pasar el invierno, cantidad que requiere 15 litros de espacio de almacenamiento, como mínimo. Así pues, el volumen no debe ser inferior a los 15 litros para que la colonia sobreviva.

¿Cómo miden las exploradoras el volumen de una cavidad? Su paseo de inspección quizá les proporcione las bases de una estimación; otra hipótesis sería que se limitan a entrar y observar el interior. A través de experimentos con cajas-colmena en las que podían alterarse la superficie a recorrer y la iluminación deduje que, para medir el volumen, las exploradoras necesitan recorrer las superficies interiores o bien una iluminación de más de 0,5 lux (aproximadamente la iluminación que da la luna llena).

¿Qué condiciones reinan en el interior de un árbol? Ciertamente, la superficie interior, de madera desnuda, puede atravesarla fácilmente una exploradora. Para medir el nivel de iluminación en una cavidad similar, construí un modelo basado en las mediciones realizadas en colmenas naturales. Tenía una serie de aberturas en el interior, en las que inserté un fotómetro. Observé que la iluminación no alcanzaba los 0,5 lux, si exceptuamos la vecindad de la entrada. En la naturaleza, pues, para evaluar el volumen de la futura colmena las abejas exploradoras recorren la superficie interior.

Para someter a contraste directo semejante hipótesis, modifiqué la percepción del volumen de una exploradora; manipulé así la longitud del paseo requerido para trasladarse de un extremo

a otro de la cavidad. El dispositivo utilizado para este experimento era una caja cilíndrica montada verticalmente sobre una plataforma giratoria que me permitía rotar suavemente la caja. A través de una ventana abierta en la parte superior podía observar el interior y ver hacia dónde se encaminaba la abeja; giraba entonces las paredes según quisiera aumentar o disminuir el recorrido efectuado.

El volumen de esta caja experimental era de 14 litros, en la frontera entre una cavidad inaceptable por pequeña y otra de tamaño adecuado. Si recorrer la superficie contribuía a la percepción del volumen, la primera exploradora hallaría más o menos atractivo el habitáculo de lo que le indicaría su verdadero volumen según se la hubiera hecho caminar, más allá o más acá, de lo que correspondía a los 14 litros. Nuestro criterio de evaluación sería el número de exploradoras reclutadas por la primera abeja para una posterior visita. Si la caja le había parecido conveniente, el número de exploradoras sería mayor que si la caja le parecía inaceptablemente pequeña. Así lo observé en cuatro sesiones de este delicado experimento. Parece claro que la estimación del volumen por parte de la exploradora es proporcional al paseo necesario para recorrerla enteramente.

La fundación de una colonia de abejas comporta muchos peligros. Para sobrevivir al primer invierno, la colonia debe vencer numerosos obstáculos: dar con un buen sitio, construir una colmena con sus panales de cera, lo que supone un elevado coste energético, criar a los jóvenes para que pasen el invierno y reunir las provisiones necesarias para la estación dura. La mayoría de las colonias no lo consiguen. Observaciones a largo plazo realizadas en las colonias que habitan en los bosques de los alrededores de Ithaca han revelado que tan sólo un 24 por ciento de las colonias recién fundadas sale del primer invierno, mientras que la tasa de supervivencia para las colonias ya establecidas es de un 78 por ciento.

Se ha comprobado, asímismo, que si una colonia remonta el primer invierno, crítico, resistirá una media de cinco años. En resumen, una colonia puede sobrevivir potencialmente durante un largo tiempo, pero se enfrenta con graves riesgos al trasladarse de una colonia establecida a otra nueva; por tanto, un enjambre no puede confiar en métodos de ensayo-error para hallar un lugar conveniente. Cada colonia debe tomar una única y cuidadosa decisión que le permita vivir varios años.

Eclipses históricos

Los primeros registros fidedignos de eclipses solares y lunares remontan al 750 a. de C. y plantean problemas tales como el de la posibilidad de que el sol se esté contrayendo o de que disminuya la velocidad de rotación de la tierra

F. Richard Stephenson

Los observadores de nuestro planeta –astrónomos, historiadores e incluso poetas– han ido anotando eclipses de sol y de luna durante más de 2500 años. Sea cual fuere su motivación, sus observaciones, tanto las antiguas como las más recientes, pueden ayudar a resolver problemas que se plantean los investigadores de hoy. Una de esas cuestiones es: ¿por qué está cambiando la duración del día (o la velocidad de rotación de la tierra)? Asimismo, ¿se está contrayendo el sol? En lo que respecta al primer problema planteado podemos obtener información del mayor interés de observaciones de eclipses que fueron realizadas mucho antes de la aparición de la astronomía telescópica. Referente al segundo, sólo nos interesan los registros de eclipses de sol totales realizados a partir del siglo XVIII.

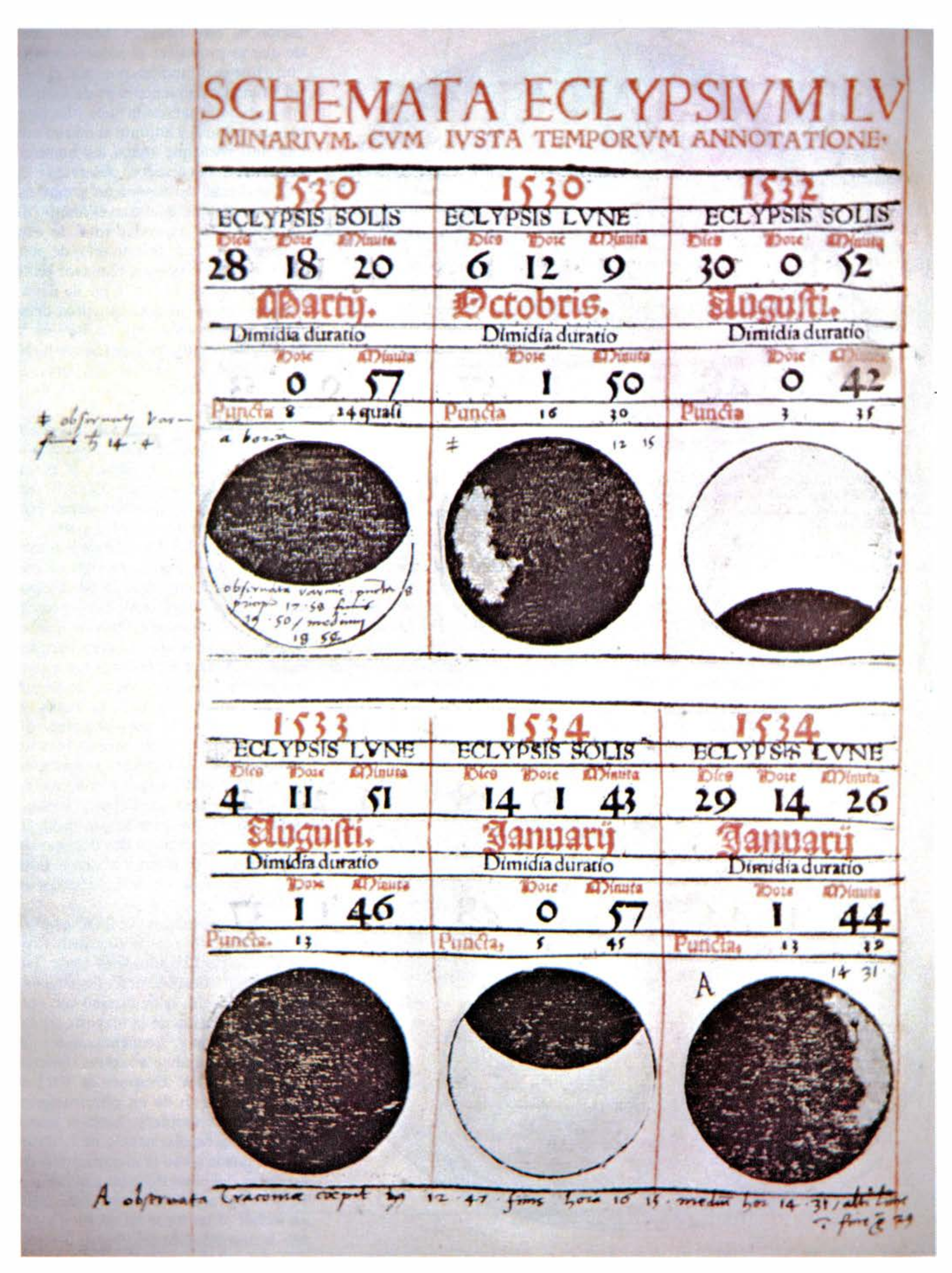
La palabra "eclipse" deriva del griego clásico, en el que *ekleipsis* significa "fracaso" en sentido propio. La metáfora es adecuada y, si las órbitas de la tierra y de la luna se encontraran exactamente en el mismo plano, estos "fracasos" resultarían mucho más frecuentes y se producirían dos veces al mes. En cada conjunción (luna nueva) habría un eclipse de sol y en cada oposición (luna llena) tendríamos un eclipse de luna. Ahora bien, dado que los planos de las dos órbitas se encuentran inclinados el uno con respecto al otro, formando un ángulo de unos cinco grados, sólo pueden producirse eclipses cuando la luna nueva o la luna llena tiene lugar en la proximidad de uno de los dos nodos de su órbita. Entendemos por nodos dos puntos, situados a una distancia de 180 grados, en los que se cortan los planos de las órbitas solar y lunar. Esta limitación implica que en un año cualquiera tengan lugar sólo dos eclipses (lo que sucederá en 1984) o bien que el número de éstos –es el caso de 1982– puede llegar a ser de siete.

Si las condiciones meteorológicas lo permiten, un hombre puede confiar en ver, durante su vida, unos 50 eclipses lunares, más de la mitad de los cuales serán totales, y tal vez unos 30 eclipses de sol parciales. Un eclipse total de sol es siempre un acontecimiento poco frecuente en cualquier lugar. Por ejemplo, el último eclipse solar total visible en las proximidades de Nueva York tuvo lugar en 1925 y el próximo no se producirá hasta 2079. El espectáculo resulta tan poco corriente debido a que los tamaños aparentes del sol y de la luna son casi idénticos y, como consecuencia de ello, el cono de sombra que proyecta la luna apenas alcanza la superficie de la tierra. La línea de totalidad puede alcanzar una longitud de 15.000 kilómetros y barrer hasta 140 grados de longitud, pero la *umbra*, o región de sombra absoluta, rara vez tiene una anchura superior a 250 kilómetros.

El que un eclipse solar determinado sea total o anular (con un anillo brillante de sol que rodea al disco lunar) depende de la posición de la luna en su órbita elíptica. Cuando la luna se encuentra próxima al perigeo –el punto de su órbita en el que se halla más cerca de la tierra– puede cubrir al sol por completo durante un período de tiempo de hasta 7,5 minutos. Cuando la luna está cerca del apogeo –el punto en el que se encuentra más alejada de la tierra– el vértice de su cono de sombra no alcanza a la tierra y el eclipse es anular. La duración de un eclipse anular puede ser de hasta unos 12,5 minutos. Los astrónomos denominan grandes acontecimientos a los eclipses totales, anulares y casi-totales, denominación que se opone a la de los pequeños acontecimientos constituidos por los eclipses parciales.

¿Es cierto que el volumen del sol se está reduciendo? Disponemos de dos grandes colecciones de datos relativos al tema en las observaciones diarias, cuando no lo impedían las condiciones meteorológicas, del tránsito del sol (para medir su ascensión recta), realizadas desde 1750 en el Observatorio Real británico, y en el Observatorio Naval de los Estados Unidos desde 1846. Las observaciones se refieren al tiempo que requiere la imagen del sol para cruzar una línea marcada sobre el ocular de un telescopio; ese intervalo, evidentemente, mide también el tamaño de la imagen. En 1979, tras estudiar una notable cantidad de datos procedentes de ambos observatorios, John A. Eddy, del High Altitude Observatory del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, y Aram A. Boornazian, matemático de S. Ross and Company de Boston, anunciaron su conclusión de acuerdo con la cual el sol se está contrayendo con bastante rapidez. Estimaron que la disminución del diámetro horizontal del sol se producía a un ritmo de dos segundos de arco (en torno al 0,1 por ciento) por siglo.

No obstante, el disco solar es brillante y la transparencia de la atmósfera solar es imperfecta y variable; ambos factores hacen que resulte difícil una determinación exacta del diámetro solar a través de este procedimiento. No debe sorprender, pues, que las observaciones individuales de tránsitos no sean muy precisas y se encuentren sometidas en gran medida a las desviaciones en que incurra el observador. Por consiguiente, la tendencia detectada por Eddy y Boornazian podría, al menos en parte, deberse a errores de observación. Una fuente de datos alternativa e independiente sobre la reducción del tamaño del sol es la duración de los eclipses totales de sol. (Un segundo control independiente puede realizarse mediante el tiempo que tarda el planeta Mercurio en cruzar el disco solar.) Estas observaciones permiten estudiar los cambios producidos en el diámetro aparente del sol a intervalos bastante regulares que remontan a los comienzos del siglo XVII, o sea aproximada-

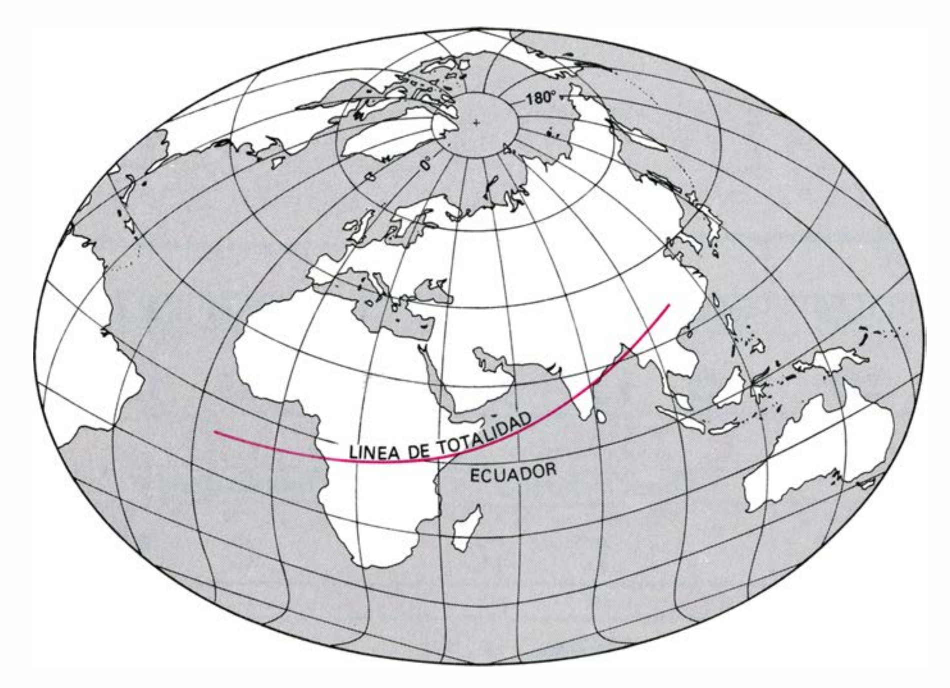


SCHEMATA ECLYPSIVM LVMINARIVM. CVM IVSTA TEMPORVM ANNOTATIONE.

1530 ECLYPSIS SOLIS	1530 ECLYPSIS LVNE	1532 ECLYPSIS SOLIS
Dies 28 · Hore 18 · Minuta 20	Dies 6 · Hore 12 · Minuta 9	Dies 30 · Hore 0 · Minuta 52
Martij.	Octobris.	Augusti.
Dimidia duratio: Hore 0 · Minuta 57	Dimidia duratio: Hore 1 · Minuta 50	Dimidia duratio: Hore 0 · Minuta 42
Puncta 8 · 14 quasi	Puncta 16 · 30	Puncta 3 · 35

1533 ECLYPSIS LVNE	1534 ECLYPSIS SOLIS	1534 ECLYPSIS LVNE
Dies 4 · Hore 11 · Minuta 51	Dies 14 · Hore 1 · Minuta 43	Dies 29 · Hore 14 · Minuta 26
Augusti.	Januarij	Januarij
Dimidia duratio: Hore 1 · Minuta 46	Dimidia duratio: Hore 0 · Minuta 57	Dimidia duratio: Hore 1 · Minuta 44
Puncta. 13	Puncta. 5 · 45	Puncta. 13 · 12

ESTA PAGINA DEL *CALENDARIUM ROMANUM MAGNUM*, publicado en el año 1518, predice tres eclipses de sol parciales (para 1530, 1532 y 1534) y tres eclipses de luna totales. El autor, Johann Stöffler, de Tübingen, fue un notable astrónomo y matemático del Renacimiento. Las notas manuscritas que aparecen en este ejemplar de la obra de Stöffler, que se conserva en la biblioteca de la Universidad de Uppsala, se deben a Nicolás Copérnico.



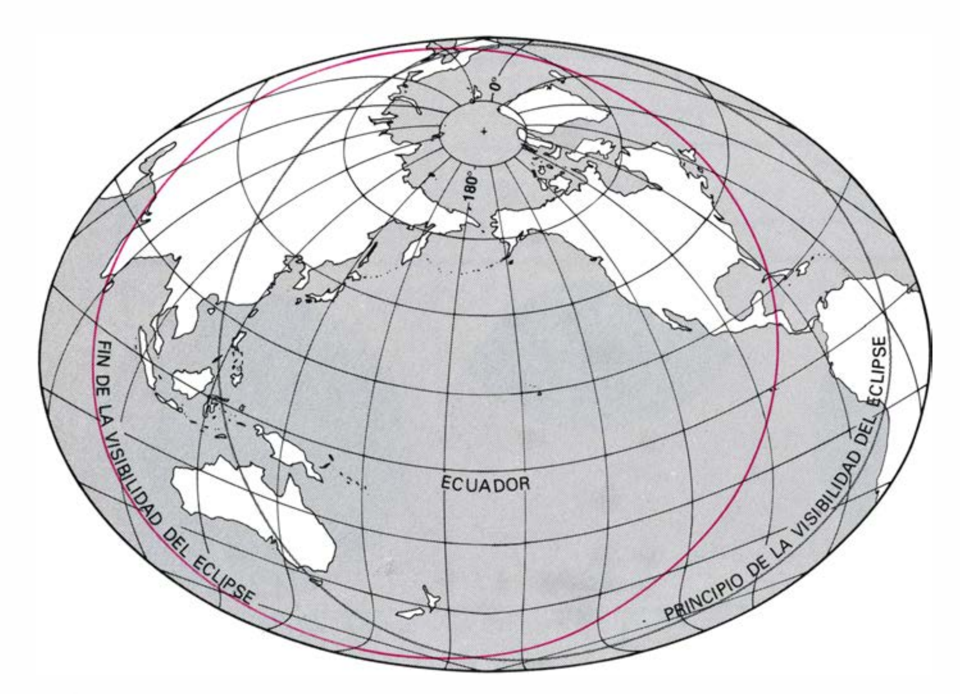
ECLIPSE TOTAL DE SOL de 1980, visible el 16 de febrero a lo largo de una línea de una anchura no superior a 150 kilómetros que, desde el oeste del primer meridiano, se dirigía hasta el oeste de China recorriendo una distancia global de 13.500 kilómetros. La fase de totalidad duró cuatro minutos.

mente durante un período de tiempo doble del que corresponde a los datos británicos y norteamericanos analizados por Eddy y Boornazian.

Pocos eclipses de sol totales pudieron verse en Europa en el siglo XVII. Sólo conozco dos observaciones: una realizada en el sur de Italia en 1605 y una segunda que se llevó a cabo en el norte de Irlanda en 1652. De hecho, la primera observación telescópica conocida de un eclipse total de sol tuvo lugar en Francia, en 1706. El primer eclipse total de sol cuya duración fue medida cuidadosamente en Europa por un número notable de observadores fue el eclipse de 1715, que tuvo lugar el 3 de mayo, de acuerdo con el calendario gregoriano. Edmund Halley es acreedor a buena parte del mérito en la realización de este esfuerzo. Mucho antes de que se produjera el acontecimiento "hizo que se difundiera por todo el Reino Unido un pequeño mapa de Inglaterra en el que aparecía la línea y los límites [del eclipse] y adjuntó al mismo una solicitud para que todos los hombres curiosos e interesados observaran lo que pudieran del fenómeno y muy especialmente que anotaran el tiempo de duración de la oscuridad total, lo cual sólo requiere el uso de un reloj de péndulo, del que disponen la mayor parte de las personas, algo que puede determinarse con la máxima exactitud debido al carácter momentáneo [*sic*] de la Ocultación y Aparición del borde luminoso del sol, una mínima parte del cual hace surgir el día".

Halley promovió esta determinación de la duración del eclipse con el fin de mejorar, en el futuro, la precisión de las predicciones de eclipses. Obtuvo nueve mediciones ostensiblemente exactas de distintas partes de Gran Bretaña. La duración de la totalidad (unos 3,3 minutos) se expresó con la precisión de un segundo de tiempo; excepto una, todas las mediciones mostraron una dispersión muy pequeña, con divergencias que no eran muy superiores al error de redondeo. La misma observación discordante se desvió en sólo siete segundos de la media de 200 segundos de las ocho restantes: no puede decirse que eso constituyera un mal resultado. Al convertir la media de las ocho observaciones en una medida del diámetro aparente del sol, tal como suele hacerse hoy, resulta que el sol, en 1715, tenía un tamaño dos décimas de segundo de arco inferior al actual (con un error probable de cuatro décimas de segundo).

El siguiente eclipse total de sol cuya duración se midió cuidadosamente tuvo lugar más de 125 años más tarde. No obstante, desde 1842 hasta los comienzos de este siglo, se determinó con precisión la duración de la mayoría de los eclipses totales y, frecuentemente, los astrónomos viajaban a lugares remotos para observarlos. Después de 1925 el centro de interés de las observaciones de eclipses se desplazó, hasta el punto de omitir la determinación de la duración, a temas como la identificación de las líneas del espectro solar y el estudio de la estructura de la corona solar. Sólo en fechas recientes se ha vuelto a plantear la necesidad de determinar la duración del eclipse con la finalidad específica de medir el diámetro aparente del sol. Este cambio de actitud se debe en buena parte a Eddy y Boornazian.



ECLIPSE TOTAL DE LUNA de últimos de este mes. Se verá, sobre todo, en el mar; y, si el tiempo lo permite, podrá observarse desde el principio (*elipse en negro*) hasta el final (*elipse de color*) en Islandia, Groenlandia, todo Canadá (excepto la parte oriental de Terranova), los 50 estados de la Unión, la totalidad de México, Japón y Corea, buena parte de la Unión Soviética oriental y ártica, Islas Filipinas y zonas de Indonesia, Australia y Nueva Zelanda durante la noche del 30 al 31 de diciembre de 1982.

AÑO	DIA	LOCALIZACION	DESCRIPCION
a.C. 709	17JULIO	CHINA	TOTAL: SIN MAS DETALLES
601	12 SEPTIEMBRE	CHINA	TOTAL: SIN MAS DETALLES
549	12 JUNIO	CHINA	TOTAL: SIN MAS DETALLES
198	7 AGOSTO	CHINA	ANULAR: SIN MAS DETALLES
181	4 MARZO	CHINA	TOTAL: SIN MAS DETALLES
136	15 ABRIL	MESOPOTAMIA	TOTAL: SE VEN MUCHAS ESTRELLAS Y CUATRO PLANETAS
d.C. 2	23 NOVIEMBRE	CHINA	TOTAL: SIN MAS DETALLES
65	16 DICIEMBRE	CHINA	TOTAL: SIN MAS DETALLES
516	18 ABRIL	CHINA	ANULAR: SIN MAS DETALLES
522	10 JUNIO	CHINA	TOTAL: SIN MAS DETALLES
840	5 MAYO	ITALIA	TOTAL: "EL SOL SE ESCONDE DEL MUNDO"
873	28 JULIO	PERSIA	ANULAR: "LA LUNA DENTRO DEL CUERPO DEL SOL"
912	17 JUNIO	ESPAÑA	TOTAL: "OSCURIDAD POCO ANTES DEL CREPUSCULO"
968	22 DICIEMBRE	TURQUIA (2)	TOTAL: SE OBSERVA LA CORONA
975	10 AGOSTO	JAPON	TOTAL: "SOL DE COLOR TINTA"
1124	11 AGOSTO	RUSIA	TOTAL: "EL SOL PERECIO POR COMPLETO"
1133	2 AGOSTO	EUROPA (5)	TOTAL: "EL SOL NEGRO COMO LA BREA"
1176	11 ABRIL	TURQUIA	TOTAL: "CAYO LA NOCHE; APARECIERON LAS ESTRELLAS"
1185	1 MAYO	RUSIA	TOTAL: SE OBSERVA LA CROMOSFERA
1221	23 MAYO	MONGOLIA	TOTAL: "LAS ESTRELLAS SE HACEN VISIBLES"
1239	3 JUNIO	EUROPA (8)	TOTAL: "SE VEN MUCHAS ESTRELLAS"
1241	6 OCTUBRE	EUROP. (2), EGIP.	TOTAL: "NEGRURA MARAVILLOSA"
1267	25 MAYO	TURQUIA	TOTAL: "APARECIERON MUCHAS ESTRELLAS"
1275	25 JUNIO	CHINA	TOTAL: "SE VEN ESTRELLAS"
1292	21 ENERO	CHINA	ANULAR: "EL SOL ES UN ANILLO DE ORO"
1406	16 JUNIO	ALEMANIA	TOTAL: "GRAN OSCURIDAD"
1415	7 JUNIO	EUROPA (2)	TOTAL: "SE ECLIPSA TODO EL SOL"
1485	16 MARZO	AUSTRIA	TOTAL: SIN MAS DETALLES

VEINTIOCHO ECLIPSES SOLARES, totales o anulares, aparecen en registros desde el siglo VIII a. de C. hasta el siglo XV de nuestra era. De los diez eclipses más antiguos que aparecen en esta tabla, todos menos uno fueron observados por astrónomos chinos. El predominio posterior de los observadores europeos se debe a la aparición de monasterios. Las observaciones múltiples se dan entre paréntesis.

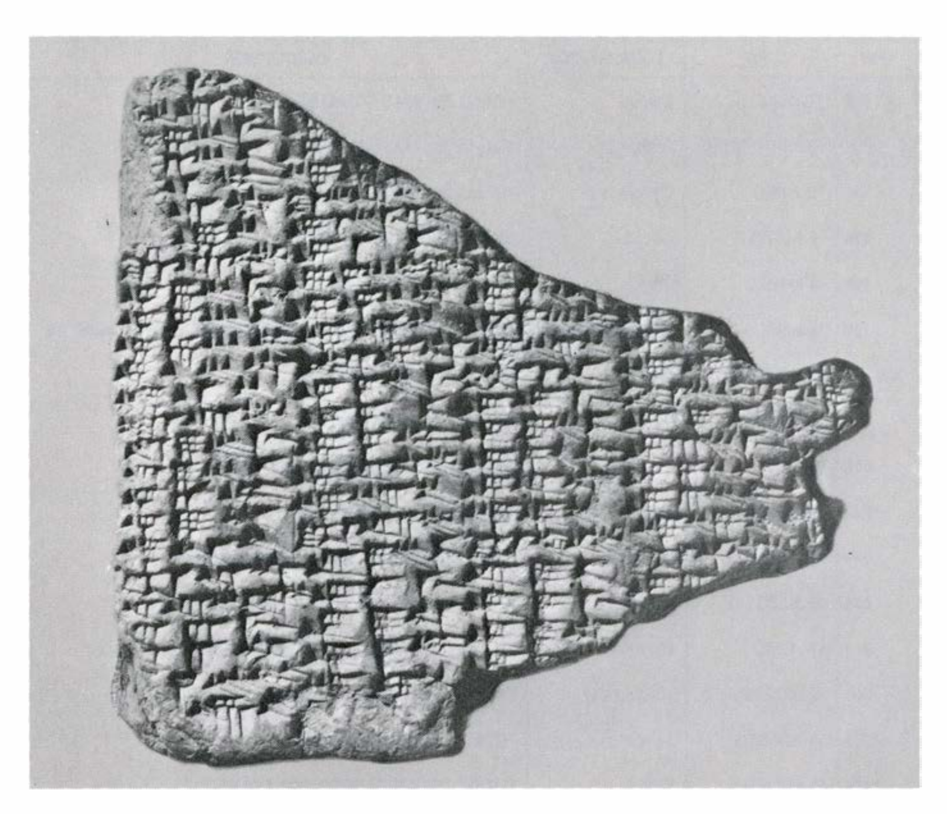
Cuando se consideran los datos relativos a la duración de los eclipses totales de sol durante, aproximadamente, los últimos tres siglos y se relacionan con los que se obtienen a partir de los tránsitos de Mercurio, se obtienen conclusiones contrarias a las que se basan en las observaciones de la ascensión recta del sol. En pocas palabras, los datos indican sólo un cambio desdeñable en el diámetro solar. John H. Parkinson, del University College de Londres, Leslie V. Morrison, del Observatorio Real de Greenwich, y el autor de este artículo han calculado que el porcentaje de decrecimiento es de 0,008 ± 0,007 por siglo. No obstante, los datos nos proprocionan una prueba bastante concluyente de que, de modo sorprendente, el diámetro del sol oscila. El período de oscilación es de unos 80 años y su amplitud es del 0,025 por ciento. Tras haber investigado una gran variedad de datos, Ronald L. Gilliland, del High Altitude Observatory, ha apoyado esta interpretación. En cualquier caso, merece la pena que, en el futuro, se efectúen mediciones del diámetro solar de manera sistemática y regular.

Para estudiar las variaciones de la velocidad de rotación de la tierra sólo nos interesan los datos relativos a las observaciones de eclipses realizadas en la Antigüedad y en la Edad Media. Desde 1620, aproximadamente, las observaciones telescópicas de ocultaciones de estrellas por la luna han sustituido a las observaciones de eclipses solares y lunares como fuente de información acerca de la duración del día. Ello se debe a que la ocultación de una estrella es casi instantánea. Entre los eclipses, únicamente el oscurecimiento total del sol puede medirse con una precisión similar y los eclipses solares totales son mucho más raros que las ocultaciones.

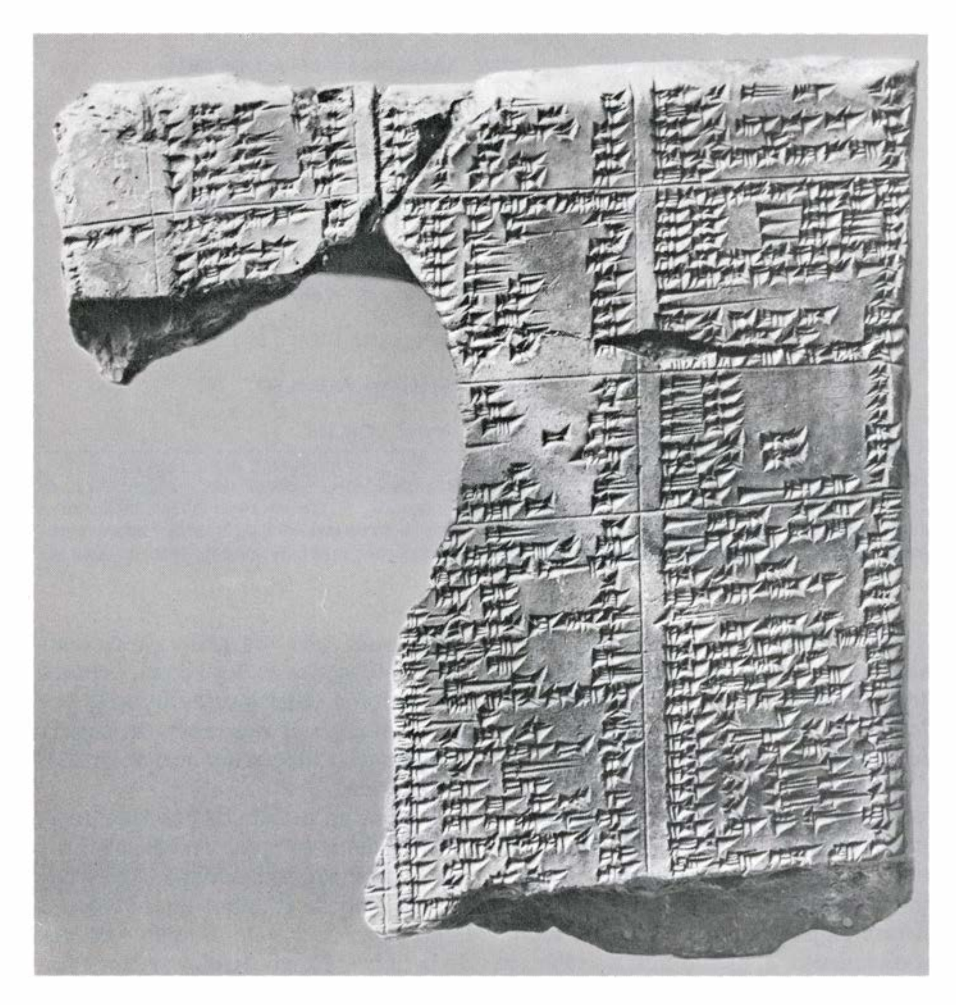
El estudio de las ocultaciones de estrellas ha revelado fluctuaciones irregulares en la duración del día que se extienden sobre períodos del orden de una década, lo que ha dado origen a la expresión "fluctuaciones decenales". Las fluctuaciones en sí mismas son muy pequeñas, no superando dos o tres milisegundos por encima o por debajo de la media, pero su efecto acumulativo resulta importante. Por ejemplo, si la duración del día fuera, de manera persistente, unos tres milisegundos superior a la media durante toda una década, el total acumulado de lo que se denomina error de reloj (la diferencia entre un reloj que diera la hora terrestre y un reloj "ideal") sería de unos 10 segundos. Morrison y yo hemos utilizado los datos de las ocultaciones para determinar con detalle las fluctuaciones decenales desde el siglo XVII hasta la actualidad.

¿Cómo pueden explicarse estas fluctuaciones? Una hipótesis sugiere que el movimiento de los fluidos del núcleo de la tierra, que son responsables del campo magnético terrestre, se asocian, electromagnéticamente o, quizá, topográficamente, al manto que los rodea y perturban la rotación del manto. Tales perturbaciones se comunicarían, entonces, a la superficie terrestre. Otra hipótesis señala que pequeñas variaciones en el nivel global de los mares, debidas a la fusión o congelación del hielo polar, alterarían el momento de inercia del planeta y afectarían a su velocidad de rotación.

A pesar de su falta de precisión relativa, los datos antiguos y medievales sobre eclipses son, sin embargo, útiles para otro tipo de estudio: los cambios a largo plazo de la velocidad de rotación de la tierra. Estos cambios se han visto enmascarados, en los últimos siglos, por los cambios a corto plazo descritos antes. Por ejemplo, se sabe desde hace



PRIMER ECLIPSE SOLAR de fecha segura. Aparece registrado en esta tablilla asiria, un resumen de acontecimientos históricos. Se trata de un gran eclipse parcial ocurrido el 15 de junio del 763 a. de C.



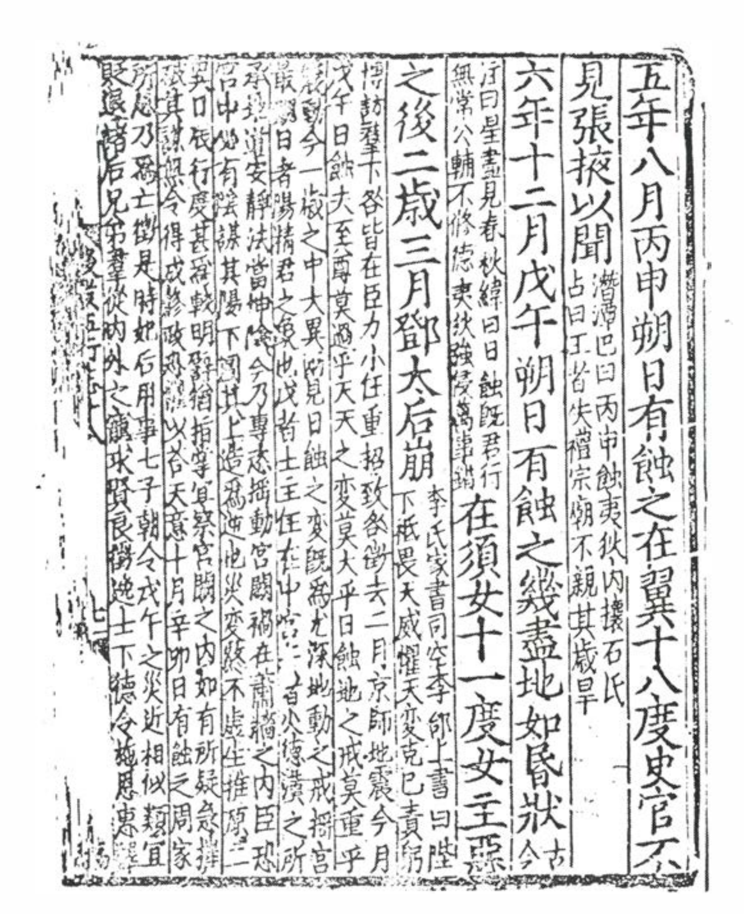
TABLILLA BABILONIA TARDIA que registra observaciones de lunas nuevas y llenas realizadas entre el 323 y el 319 a. de C. Como la tablilla asiria, se encuentra entre los textos antiguos del Museo Británico.

tiempo que las mareas de los océanos terrestres, debidas a las influencias gravitatorias de la luna (y, en menor grado, del sol) frenan la rotación de la tierra y, por consiguiente, son responsables de un incremento gradual de la duración del día. La influencia de las mareas lunares puede valorarse fácilmente en la actualidad merced a los estudios modernos sobre los movimientos lunares como, por ejemplo, las alineaciones lunares estimadas con rayos láser. Estos estudios muestran que la órbita lunar se está agrandando lentamente, de tal modo que nuestro satélite se aleja de su planeta a una velocidad de unos cuatro centímetros por año.

Ambos fenómenos están relacionados entre sí. A medida que disminuye la velocidad de rotación de la tierra, el planeta pierde momento angular. Se conserva, no obstante, el momento angular del sistema tierra-luna y, por ello, lo que la tierra pierde lo gana la luna. Un satélite situado en órbita que gana momento angular pierde velocidad y por consiguiente se aleja de su planeta; eso es lo que le sucede a la luna. Los cálculos indican que la ganancia del momento angular de la luna debido a las mareas añade unos 0,04 segundos a la longitud del mes en cada siglo.

Como ocurre con las fluctuaciones decenales, este pequeño cambio parece trivial. Sus efectos a largo plazo son importantes, no obstante. Consideremos, por ejemplo, que la fricción de las mareas se ha mantenido igual durante muchos millones de años. En ese caso, hace 100 millones de años, en los tiempos mesocretáceos, la distancia media entre la tierra y la luna habría sido 4000 kilómetros menor que la actual, y, los meses, algo más de 11 horas más breves.

¿Cómo pueden obtenerse datos útiles sobre una disminución gradual de la velocidad de rotación de la tierra a partir de los registros de eclipses antiguos y medievales? Consideremos el error del reloj. En un período de 100 años, un reloj que diera la hora terrestre perdería unos 45 segundos en comparación con un reloj ideal, debido al efecto de las mareas sobre la rotación de la tierra. Es más, si se consideran períodos de tiempo aún más largos, el incremento en el error del reloj es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido. Por ejemplo, hace 1000 años el error acumulado del reloj sería de una hora y cuarto y, hace 2000 años, de cinco horas. Ya que al menos algunos registros de eclipses tienen más de 2000 años de antigüedad, si logramos determinar algunas de las condiciones de las observaciones, tales registros nos proporciona-


五年八月丙申朔日有蝕之在翼十八度史官不
見張掖以聞
六年十二月戊午朔日有蝕之幾盡地如昏狀
在須女十一度女主惡之
之後二歲三月鄧太后崩

DOS TEXTOS HISTORICOS que incluyen referencias a eclipses de sol: la historia oficial de la dinastía Han oriental (*izquierda*) y la Crónica del Patriarca de Antioquía Miguel el Sirio (*derecha*). El texto chino describe los eclipses solares de los años 118 y 120 d. de C., el último de los cuales se consideró como un presagio de la muerte de la emperatriz viuda en el 122 d. de c. El texto siriaco describe con detalle un eclipse total ocurrido el 1176 d. de C.

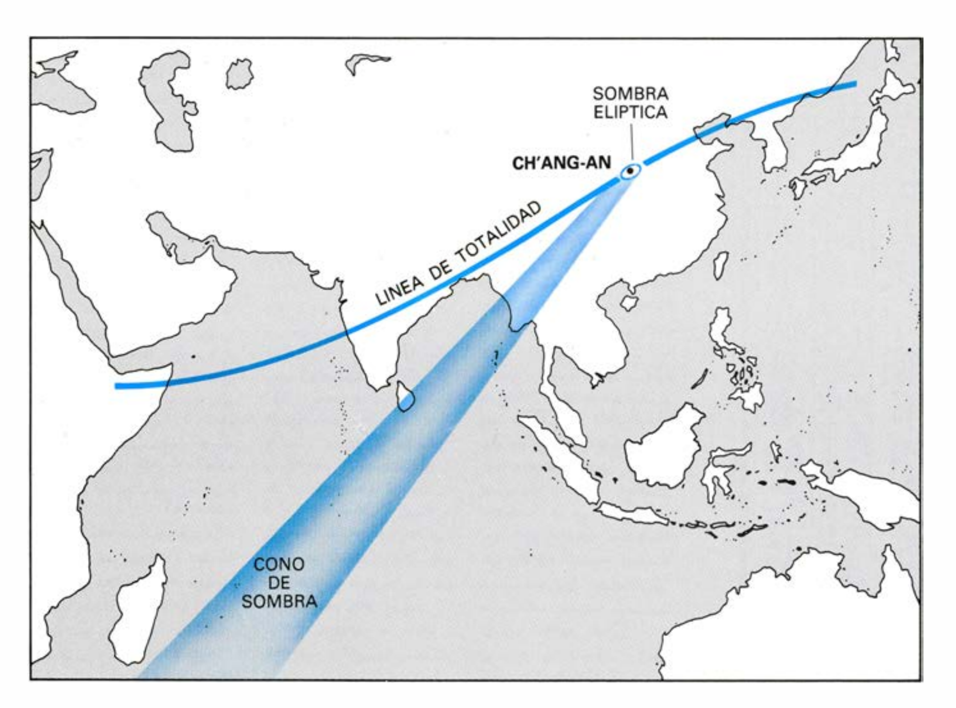
rán informaciones significativas sobre las tendencias de la velocidad de rotación de la tierra.

Antes de presentar las conclusiones que pueden deducirse de tales registros resultará útil indicar qué criterios deben satisfacer las observaciones primitivas y establecer una relación resumida de las observaciones, área por área. Para que una observación primitiva tenga interés debe encuadrarse en una de las tres categorías siguientes. La primera es la que ofrece las informaciones más valiosas: eclipses de sol y de luna con datos temporales. La segunda comprende los eclipses solares y lunares que aparecen en los registros sin datos temporales, pero de los que se nos dice que han tenido lugar cerca de la aurora o del crepúsculo. La tercera está constituida por los eclipses de sol sobre los cuales carecemos de información temporal, aunque aparecen registrados como grandes acontecimientos: eclipses casi totales o totales.

En lo relativo a las áreas en las que se llevaron a cabo las observaciones, éstas empezaron en Babilonia. Desde el año 750 a. de C., por lo menos, los astrónomos babilonios empezaron a interesarse activamente en la observación precisa de muchos fenómenos celestes. No podemos saber si se realizaron observaciones, en Babilonia o en otros lugares, anteriores a la fecha antes citada, dado que conservamos muy pocos registros históricos de etapas más antiguas. Las observaciones babilonias continuaron sistemáticamente desde el año 750 a. de C., aproximadamente, hasta por lo menos el año 50 a. de C. y posiblemente continuaron hasta bien entrado el primer siglo de nuestra era. Este gran *corpus* de datos astronómicos era bien conocido por los antiguos griegos. El astrónomo griego Ptolomeo de Alejandría, que escribió a principios del siglo II de nuestra era, afirma haber tenido acceso a observaciones babilonias de eclipses que remontan al año 747 a. de C. Desgraciadamente, Ptolomeo, en su *Mathematikē Syntaxis* (obra mejor conocida por su nombre árabe de *Almagesto*), sólo da resúmenes muy breves de los primitivos registros babilonios.

La decadencia gradual de Babilonia se produjo después del año 300 a. de C., aproximadamente, y hacia el año 100 de nuestra era la ciudad quedó desierta. Tuvieron que transcurrir más de 1700 años hasta que se redescubrieran las tablillas astronómicas babilónicas, que fueron encontradas accidentalmente por traperos que excavaban en busca de antiguos ladrillos de arcilla cocida para utilizarlos en nuevas construcciones. La mayoría de las tablillas astronómicas que aún conservamos, muchas de ellas en condiciones fragmentarias, se encuentran actualmente en el Museo Británico. Los materiales recuperados representan sólo alrededor del 5 por ciento del archivo primitivo y buena parte de ellos no pueden fecharse. Sólo las futuras excavaciones podrán determinar si existen, aún, más tablillas por descubrir.

La práctica habitual de los babilonios era medir el intervalo entre el comienzo de un eclipse y el orto o el ocaso del sol con ayuda de una clepsidra, un reloj de agua; habitualmente se medían también las duraciones de las diversas fases. Se expresaba el tiempo mediante unidades denominadas *uš*, que correspondían al intervalo de cuatro minutos que necesita la esfera celeste para girar un grado. Solían también estimar los babilonios el grado de totalidad de un eclipse expresándolo como una fracción del diámetro solar o lunar. Se anotaba, por último, si se producía el orto o el ocaso del sol o de la luna a lo largo de la duración del eclipse.



ECLIPSE TOTAL DE SOL registrado por los astrónomos de la corte de Ch'ang-an (actualmente Sian), capital a la sazón de la dinastía Han occidental de China, el 4 de marzo del 181 a. de C. Esta observación evidencia que la velocidad de rotación de la tierra disminuye gradualmente. Si no se tiene en cuenta el incremento resultante en la duración del día, la línea de totalidad no pasaría sobre Ch'ang-an, como prueban los registros históricos chinos. En el dibujo, obra de Andrew Tomko, se exagera la forma cónica de la sombra de la luna en el espacio y la forma elíptica de la sombra que se proyecta sobre la tierra.

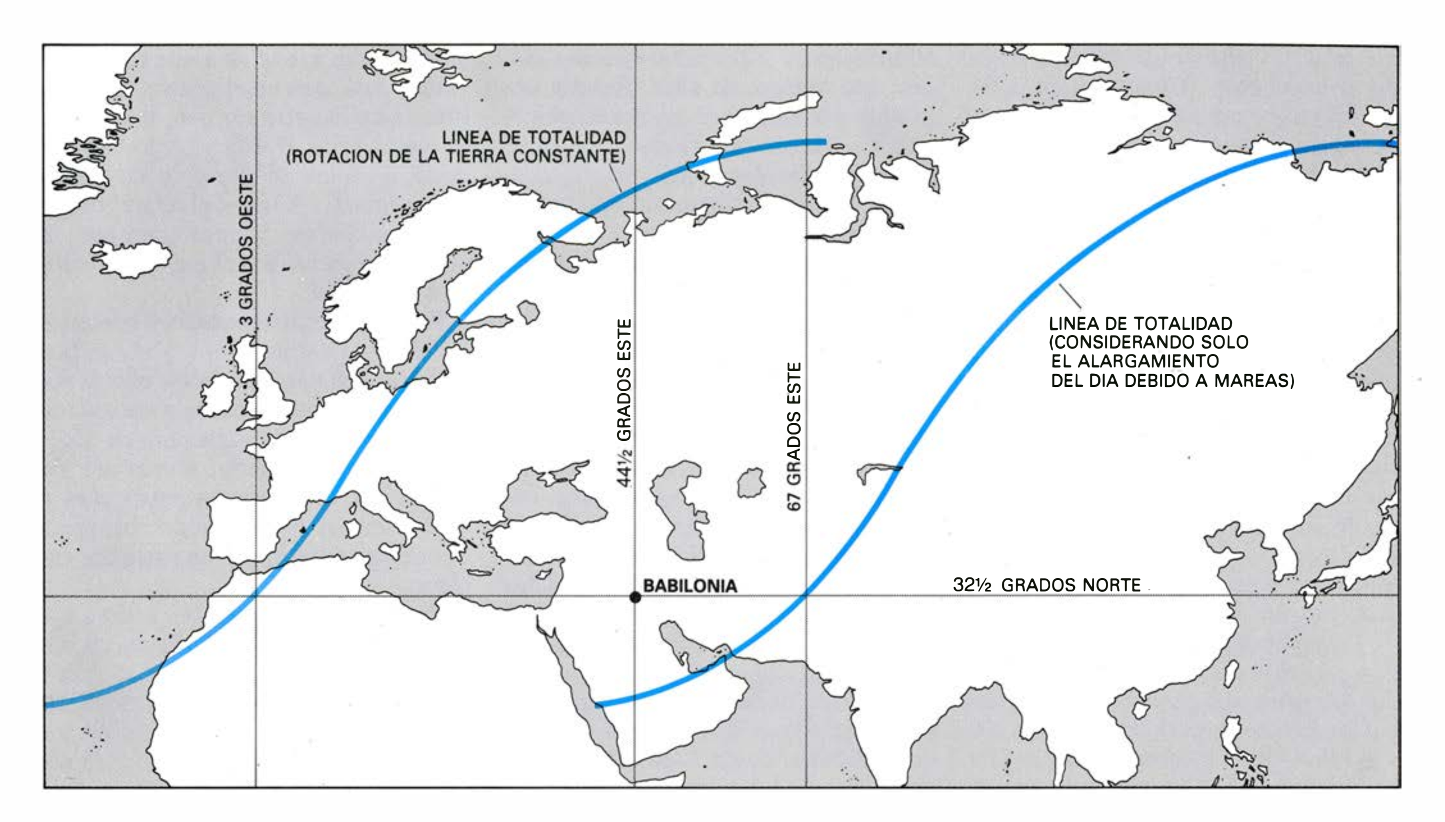
Un registro típico de eclipse, correspondiente al año 240 a. de C., puede traducirse de la manera siguiente: "Mes ocho, día 14, a tres *uš* antes del amanecer, empezó [un eclipse de luna] en el lado oriental. [La luna] se puso eclipsada". Esta relación, aunque breve, incluye dos datos de la mayor importancia. En primer lugar, la afirmación de que el eclipse empezó sólo unos 12 minutos antes del amanecer resulta muy exacta y se encuentra de acuerdo con el error de reloj que puede calcularse para el año 240 a. de C. Por otra parte, dado que la observación empezó muy próxima a un momento bien definido, como el amanecer, resulta poco probable un error en el cálculo del tiempo, un problema nada desdeñable cuando tenemos que jugar con instrumentos de medida tan primitivos como la clepsidra. En segundo lugar, la afirmación de que la luna se puso eclipsada contrarresta la posibilidad de un error de escriba al anotar la hora: parte del eclipse debió resultar visible en el momento en que un sector del disco lunar se encontraba aún por encima del horizonte. Dado que podemos computar con precisión las horas locales del orto del sol (y de la luna) y del ocaso del sol (y de la luna) incluso para fechas muy distantes, y estos cálculos resultan virtualmente independientes del error de reloj, esta segunda parte de la observación nos proporciona una alternativa viable a la primera parte en el caso de que ésta resultara errónea. Ya que el texto nos da también el año de la observación de acuerdo con el calendario seléucida, podemos deducir rápidamente la fecha juliana, que corresponde al 3 de noviembre del año 240 a. de C. El cálculo moderno muestra que, efectivamente, ese día pudo verse un eclipse de luna en Babilonia. Un grado tal de exactitud al anotar las fechas es característico de todos los registros astronómicos babilónicos.

Los registros babilónicos, a pesar de los muchos que se han perdido, incluyen unas 40 observaciones útiles de eclipses solares y lunares, con y sin datos de carácter temporal. No obstante, sólo se registró un único eclipse total de sol. Afortunadamente, la colección del Museo Británico contiene dos tablillas independientes que describen el suceso. La fecha anotada (el día 29° del mes intercalar 12° del año 175 del calendario seléucida) corresponde al 15 de abril del año 136 a. de C. Una de las dos tablillas afirma que el eclipse fue total y añade que se inició 24 *uš* después del amanecer y que alcanzó la totalidad 18 *uš* después.

La segunda tablilla cuenta que la duración de todo el eclipse fue de 35 *uš*, lo que concuerda muy bien con el tiempo transcurrido entre el inicio del eclipse y la fase de totalidad según la primera tablilla. El escriba procede, por otra parte, a darnos una descripción adicional que incluye detalles que convierten este texto en la relación más notable de un eclipse total de sol anterior al siglo XVIII. Debo la traducción que sigue a Abraham J. Sachs, de la Universidad Brown: "Veinticuatro *uš* después del amanecer un eclipse de sol [produjo oscuridad] en el lado sudoeste en el momento en que se inició... Venus, Mercurio y las estrellas normales [se refiere a las que se encontraban entonces por encima del horizonte] eran visibles; Júpiter y Marte, que se encontraban en su período de desaparición [se refiere al intervalo entre su ocaso y su orto helíacos], eran visibles en aquel eclipse... [La sombra] se movió del sudoeste al nordeste". Aquí, aparte de la determinación del tiempo de la duración del fenómeno, la descripción de la visibilidad de los planetas y estrellas más de hora y media después del amanecer constituye una señal clara de que se trata, efectivamente, de un eclipse total y nos proporciona un dato muy preciso. Los textos, en combinación con los otros registros babilónicos de eclipses solares y lunares, constituyen con mucho la mejor colección de datos relativos a los cambios de velocidad de la rotación de la tierra que proceden de la antigüedad.

Si resulta correcta la relación que hace Ptolomeo de las observaciones babilónicas, debe concluirse que se llevaron a cabo observaciones de eclipses en el Próximo Oriente antes que en el Lejano Oriente. Pese a su antigua tradición histórica, China carece de todo registro fiable de eclipses anterior al 720 a. de C. A continuación, y durante un período de 240 años, sólo los astrónomos de un pequeño estado (Lu, donde nació Confucio) registraron 37 eclipses solares, de tres de los cuales se afirma que fueron totales. Se trata de un *corpus* que contiene la mayoría de las observaciones de eclipses solares conocidas en el mundo entero hasta el año 480 a. de C. El grafema chino utilizado para identificar la totalidad, *chi*, fue, en un principio, un pictograma de un hombre que apartaba la vista de un plato de comida, indicando que estaba saciado; los astrónomos chinos lo siguieron utilizando durante otros 2000 años para designar eclipses totales y anulares.

Los registros Lu resultan particularmente impresionantes por la precisión de sus fechas; casi todos coinciden con los días que se determinan mediante los cálculos modernos. En cambio, resulta decepcionante que omitan información acerca de la hora del día y que muy pocos se describan al detalle; prácticamente todas las observaciones astronómicas chinas son deficientes a este respecto. Por consiguiente, para compro-

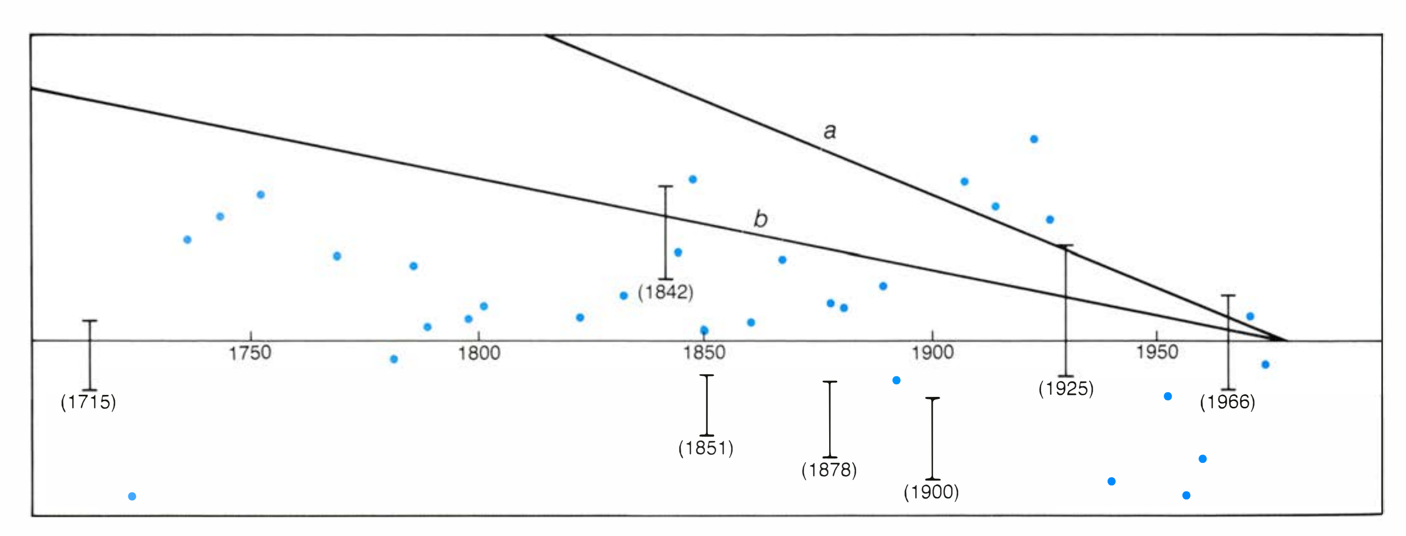


LA DOBLE INFLUENCIA que repercute en el ritmo neto de disminución de la velocidad de rotación de la tierra se representa en este diagrama del eclipse total de sol del 15 de abril del año 136 a. de C., del que nos ofrecen datos los registros babilónicos. Si la velocidad de rotación de la tierra hubiera sido la actual, la línea de totalidad del eclipse hubiera pasado muy al oeste de Babilonia, a más de 47 grados de longitud de la ciudad. Si el único factor que afectara la rotación fuera la fricción debida a las mareas, la línea se hubiera desplazado hacia el este de Babilonia en más de 22 grados. Dado que el eclipse fue, efectivamente, total en Babilonia, algún factor acelerante de la velocidad de rotación debe haber contrarrestado en parte el efecto de las mareas.

bar de nuevo las tendencias a largo plazo en la duración del día, sólo podemos utilizar los tres eclipses totales de sol que encontramos en los registros Lu.

La tiránica “quema de libros” que llevó a cabo el fundador de la efímera dinastía Ch’in, en el 213 a. de C., puede explicar la escasez de registros de eclipses en las restantes regiones de China. No obstante, inmediatamente después, con el advenimiento de la dinastía Han en el 206 a. de C., la situación cambió de manera espectacular. A partir de esa fecha, y hasta la caída de la dinastía Ch’ing (Manchú) en el año 1911 de nuestra era, se registró prácticamente todo tipo de fenómeno celeste observable a simple vista en China.

Los registros aclaran que el propósito fundamental de todas las observaciones se encaminaba hacia la astrología política con vistas a los intereses del emperador y de su familia. Véase, por ejemplo, una descripción de un eclipse casi total que tuvo lugar el 18 de enero del año 120 de nuestra era: “Hubo un eclipse de sol. Fue casi completo y, so-



HIPOTESIS DE UN SOL EN PROCESO DE CONTRACCION, propuesta en 1979 tras el análisis de miles de mediciones de la ascensión recta del astro. Parece estar en contradicción con las mediciones basadas en la duración observada de 30 tránsitos de Mercurio (*puntos de color*) y en seis eclipses de sol que tuvieron lugar entre 1715 y 1925 de nuestra era. Las dos líneas inclinadas indican dónde se habrían encontrado las mediciones del diámetro aparente del sol si éste se hubiera contraído, efectivamente, a un ritmo de un segundo de arco por siglo (*a*) o a la mitad del ritmo anterior (*b*). Los eclipses ocurridos entre 1715 y 1925 fueron cronometrados por un número de observadores que se sitúa, por término medio, entre 10 y 20; los tránsitos de Mercurio lo fueron, frecuentemente, por más de 100 observadores. Las medias de las mediciones de eclipses aparecen con el correspondiente año; las barras de dispersión representan el nivel de confianza del 95 por ciento. El análisis de ambas series de observaciones apoya la conclusión de que el diámetro aparente del sol cambia a un ritmo de menos de 0,16 ± 0,14 segundos de arco por siglo, lo que constituye esencialmente un resultado nulo. Es evidente, no obstante, que se producen variaciones sustanciales, lo que implica que, en una escala temporal de décadas, tienen lugar fluctuaciones reales del diámetro solar.

bre la tierra, parecía que hubiese llegado el anochecer. [El sol] estaba a 11 grados en [la mansión lunar] (*Hsü-nu*). La mujer que gobernaba le mostró aversión. Dos años y tres meses más tarde murió la emperatriz viuda".

Los tratados astronómicos imperiales ofrecen unas 10 relaciones de eclipses solares totales y anulares: los dos últimos tuvieron lugar en los años 1275 (total) y 1292 (anular) de nuestra era. La relación del eclipse de 1292, en la que se afirma que "el sol parecía un anillo de oro", es una de las escasas descripciones claras de un eclipse anular realizadas en cualquier parte del mundo antes de la época moderna.

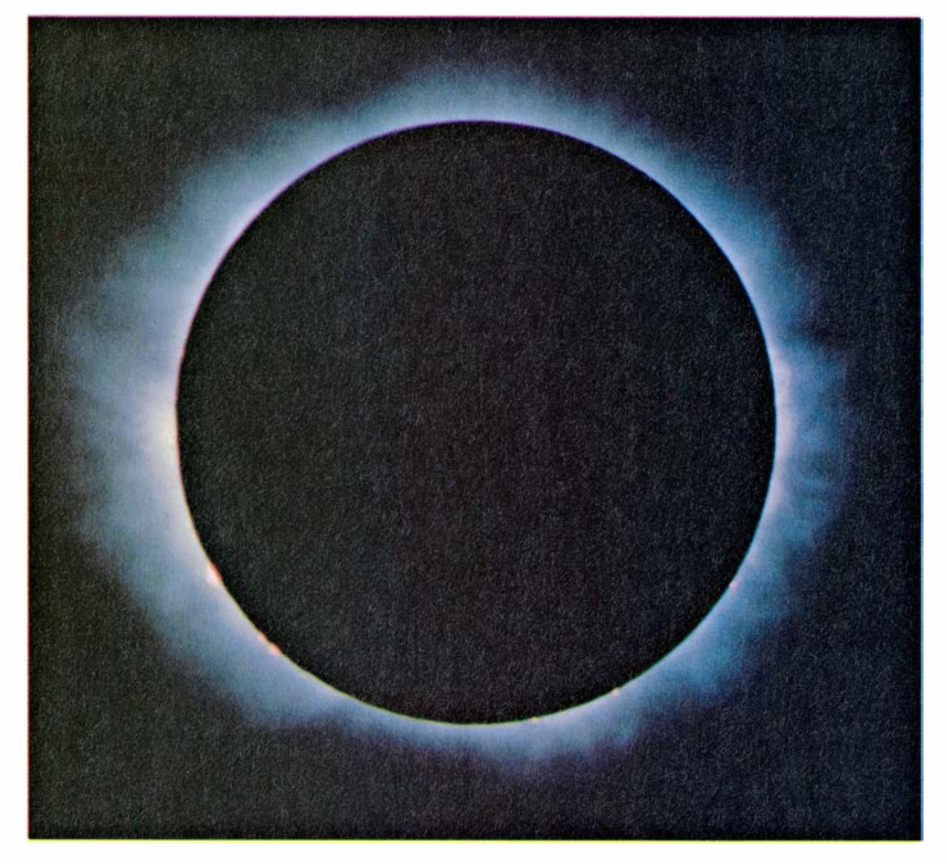
De nuevo en Occidente, o por lo menos en Alejandría, el *Almagesto* de Ptolomeo registra nueve observaciones, con datos temporales, de eclipses de luna realizadas por astrónomos griegos en dos breves períodos: entre el 200 y el 140 a. de C. y entre el 125 y 136 de la era cristiana. Con una sola excepción, los observadores se encontraban siempre en Alejandría. Sus registros son, en general, bastante burdos, con indicaciones sobre la hora del día realizadas con una aproximación de un tercio de una hora; pero si los consideramos en bloque, constituyen un complemento útil a las observaciones babilónicas, que van acompañadas de datos temporales, y a las observaciones chinas, que carecen de ellos. Resulta imposible determinar si las nueve observaciones fueron seleccionadas de entre un *corpus* de datos más amplio o si constituyen el conjunto de todo lo que Ptolomeo pudo encontrar.

Debemos avanzar hasta la Edad Media para encontrar nuevas referencias a eclipses que resulten útiles desde el punto de vista astronómico: éstas aparecen tanto en Europa como en los dominios árabes. En Europa, un número creciente de centros monásticos conservaban crónicas de acontecimientos trascendentes, tales como terremotos, cometas brillantes y eclipses de sol y de luna. Resultado de ello fue que encontramos más registros de eclipses totales de sol en crónicas monásticas que en todas las restantes fuentes anteriores al 1700 juntas. Así, el eclipse total de sol del 1239 de nuestra era fue registrado por ocho comunidades monásticas independientes, desde España hasta Yugoslavia.

Al igual que sucede con el eclipse casi total del año 120 de la era cristiana observado en China, el registro medieval de un eclipse casi total puede tener interés. Aquí tenemos el relato de una de estas observaciones, realizada el 2 de agosto de 1133 en Praga: "Un eclipse de sol apareció de manera maravillosa; [el sol] disminuyó gradualmente hasta quedar reducido a una corona similar a una luna en el cuarto creciente situada en la parte sur que, más tarde, se volvió hacia el este y luego hacia el oeste. Finalmente recuperó su condición original". Aunque el relato resulta un tanto confuso, parece claro que en ningún momento el sol quedó cubierto de forma total.

Pocas crónicas monásticas posteriores al año 1300 de la era cristiana han aparecido en compilaciones: ello se debe a que resultan demasiado numerosas para que pueda llevarse a cabo fácilmente su publicación. Resultado de ello es que estas fuentes potenciales y tardías de las observaciones europeas de eclipses están en buena parte por explotar.

En las zonas sometidas a dominio árabe, la astronomía científica, tal como la conocemos, no empezó hasta unos 150 años después de la aparición del Islam. El primer gobernante que fomentó activamente el cultivo de la astronomía fue el califa al-Mansur, que fundó Bagdad en el año 762 d. de C.; en efecto, el horóscopo fundacional de la ciudad fue levantado por un astrónomo persa. El interés islámico por la astronomía se desarrolló en Bagdad y en El Cairo y, más tarde, en los dos extremos del mundo musulmán: Córdoba en España y Samarcanda en el Asia Central. El mundo islámico nos ha legado dos tipos distintos de observaciones. Por una parte disponemos de observaciones de eclipses solares y lunares, con cuidadosas determinaciones temporales, llevadas a cabo por astrónomos competentes en observatorios bien equipados. Por otra, aparecen también observaciones esporádicas de eclipses totales o casi totales, registradas por autores muy diversos en un estilo no técnico similar al de las crónicas europeas.



PARTE INTERNA de la corona solar, normalmente invisible. Rodea la circunferencia de la luna en esta fotografía del eclipse ocurrido el 16 de febrero de 1980. Los puntos de color son prominencias solares.

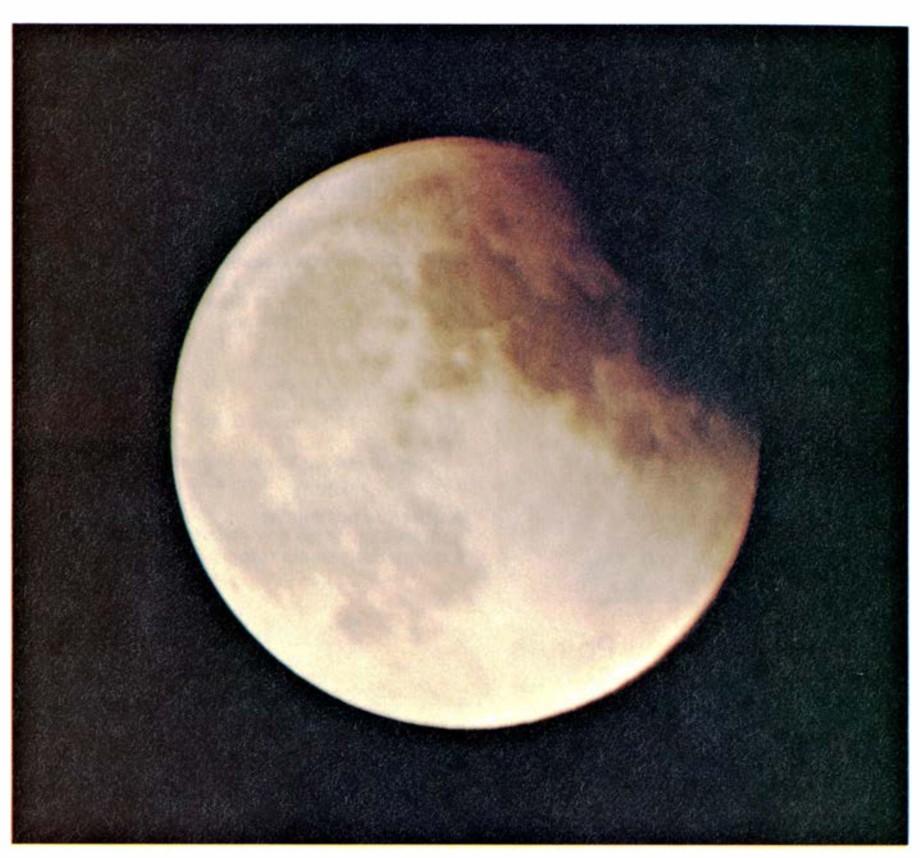
En los observatorios de Bagdad y de El Cairo se realizaron numerosas observaciones entre el año 800 y el 1000 d. de C. Fueron estudiadas por vez primera, hace un siglo, por el astrónomo norteamericano Simon Newcomb. Dos de ellas bastarán para dar una idea de la competencia de los astrónomos árabes: en ambos casos se midió la altura del sol o de una estrella brillante adecuada con una aproximación de un grado o de medio grado al principio y al final del eclipse. Así, al describir el eclipse parcial de sol del 8 de junio del año 978, observado en El Cairo, el registro dice lo siguiente: "La altura del sol en el momento en que el eclipse empezó a ser perceptible era aproximadamente de 56 grados; su altura al final

era, aproximadamente, de 26 grados". En relación con el eclipse de luna del 14 de septiembre del año 927, observado en Bagdad, el registro anota: "Altura de Sirio al principio, 31 grados al este; la revolución de la esfera celeste desde el ocaso de sol hasta el comienzo del eclipse, determinada con el astrolabio, era de unos 148 grados". Resulta interesante que, para la observación de eclipses y de otros acontecimientos a lo largo de una buena parte del siglo XVII, fuera práctica común en la astronomía europea la determinación de la altura de un astro en lugar de una medida directa del tiempo; este uso sólo se abandonó cuando se dispuso de relojes fiables.

Son escasas las observaciones no técnicas de eclipses de sol casi totales y totales realizadas por los árabes. Ello se debe, probablemente, al hecho de que las crónicas árabes, muchas de las cuales se encuentran todavía manuscritas, no han sido aún investigadas sistemáticamente. Un estudio reciente de Bernard R. Goldstein, de la Universidad de Pittsburgh, ha puesto de relieve una relación, breve y precisa, de un eclipse anular citada en uno de los tratados del astrónomo árabe al-Biruni pero referida al eclipse del 28 de julio del año 873 tal como fue observado en Nishapur, Persia. La mención de al-Biruni reza lo siguiente: "[El astrónomo al-Iranshahri] anotó que el cuerpo de la luna se encontraba en medio del cuerpo del sol, de tal modo que la luz de la porción restante del sol lo rodeaba y no quedaba eclipsada; queda, pues, claro que el diámetro aparente del sol es mayor que el de la luna". Esta última afirmación, una interpolación de al-Biruni, es obviamente errónea, pero Tycho Brahe llegó más tarde y de manera totalmente independiente a la misma conclusión equivocada.

Tal como muestran los diversos ejemplos mencionados, tomados de fuentes que se escalonan a lo largo de los últimos 2500 años, existe un rico arsenal de observaciones de eclipses de sol y de luna que puede utilizarse para el estudio de la historia de la rotación de la tierra. No obstante, estos datos no son precisamente ideales. Existe, por ejemplo, un vacío de información entre los años 100 y 800 d. de C.; y encontramos poco material útil entre el 1300 y el 1600 de nuestra era. No podemos, por consiguiente, en el estado actual de nuestros conocimientos, escribir una historia continua de las variaciones de la velocidad de rotación de la tierra. ¿Hasta dónde podemos llegar?

Para analizar la observación de un eclipse debemos computar con gran precisión las coordenadas celestes del sol y de la luna. No es difícil computar la posición del sol. A fines del siglo XIX, Newcomb elaboró una teoría detallada de los movimientos de la tierra y de los restantes planetas interiores que giran en torno al sol; su teoría se utiliza aún hoy para computar los datos del *Astronomical Almanac* y efemérides similares. Cuando se comparan las posiciones aparentes del sol, tal como se ven desde la tierra, computadas a partir de la teoría de Newcomb, con las posiciones calculadas a partir de unas efemérides dinámicas e integradas, no se obtienen diferencias significativas a lo largo del período histórico.



DOS COMPONENTES de la sombra de la tierra aparecen en esta fotografía del eclipse total de luna del 9 de enero de 1982, tomada cuando la totalidad iba progresando. Lo que parece un cuarto creciente que falta en el borde de la luna es el sector de sombra; la banda más clara es el sector de penumbra profunda.

Más difícil resulta, en cambio, el cómputo de las coordenadas celestes de la luna. La teoría lunar moderna, resultado en buena parte de la obra de Ernest W. Brown, de la Universidad de Yale, realizada a principios de este siglo, podría proporcionar unas efemérides lunares muy precisas computadas para cualquier día del pasado histórico si fuéramos capaces de establecer exactamente la velocidad con la que la luna se separa de la tierra.

Tal vez ello resulte posible en el futuro, pero hoy por hoy los astrónomos son incapaces de computar las coordenadas de la luna hace 2000 años con una precisión superior a la décima parte de un grado. Este amplio margen de incertidumbre dificulta los cálculos relativos a los cambios de la velocidad de rotación de la tierra en el pasado. Mas no impide que pueda obtenerse información interesante de los antiguos datos sobre eclipses.

Consideremos el único eclipse total de sol anotado en los registros babilónicos: el eclipse del año 136 a. de C. Se trata, posiblemente, de la observación antigua de eclipses más fiable de que disponemos. Si dejamos de lado la incertidumbre relativa a la posición de la luna, ¿cuánto adelantaría ahora un reloj ideal que se hubiera puesto en marcha en el año 136 a. de C. comparado con un reloj terrestre? El error del reloj estaría comprendido entre 3,13 y 3,38 horas; cualquier error que se situara fuera de estos márgenes convertiría el eclipse del 136 a. de C. en un eclipse parcial en Babilonia, lo que estaría en contradicción con el registro histórico.

Si tomamos el conjunto de todos los datos antiguos (la mayor parte de los cuales son observaciones babilónicas, aunque debe tenerse también en cuenta un número mucho menor de observaciones chinas), el ritmo medio de alargamiento del día desde la antigüedad es de 1,78 ± 0,11 milisegundos por

siglo (la tolerancia de error de observación es sólo de ± 0,02 milisegundos por siglo). Si reunimos de la misma manera los datos medievales, el valor medio desde el año 1000 de nuestra era resulta significativamente menor: 1,45 ± 0,15 milisegundos por siglo. Estas cifras resultan comparables con las que se obtienen a partir de las mareas: 2,51 milisegundos por siglo.

Si la fricción de las mareas está decelerando el giro de la tierra, otros factores lo aceleran. El nivel del mar influye. Algunos autores sugieren que el planeta se está contrayendo; otros proponen que el núcleo está en expansión debido al calor continuo engendrado por los isótopos radiactivos que contiene. Cualquiera de los dos procesos disminuiría el momento de inercia del planeta, acelerando su velocidad de rotación y, por consiguiente, acortando la duración del día. El ritmo medio de alargamiento del día desde la antigüedad hubiera resultado mayor, a no ser por esta influencia aceleradora. Por otra parte, el menor ritmo medio de alargamiento del día que se obtiene de las fuentes medievales sobre eclipses se debe a una duplicación aproximada de la componente aceleradora en los siglos más recientes. Parece, pues, que a lo largo de unos millares de años la aceleración de la rotación de la tierra ha tenido un carácter bastante variable.

A falta de cualquier otra explicación adecuada, la tendencia, no debida a mareas, a la reducción del día puede atribuirse a una disminución gradual del momento de inercia de la tierra, cualquiera que sea su causa: cambios en el nivel del mar, una reducción del tamaño del planeta o la redistribución de materias situadas en su interior. Si juzgamos a partir de los valores decrecientes del ritmo medio de alargamiento del día, el coeficiente de disminución del momento de inercia en los últimos siglos es aproximadamente el doble de lo que fue en la antigüedad. Ahora bien, un cambio tan sencillo como una disminución de 1,2 metros en el nivel medio del mar en los últimos 2500 años hubiera dado lugar al primitivo, y menor, coeficiente de disminución. Si dispusiéramos de mejores datos que los que están hoy a nuestro alcance acerca de los niveles medios del mar en el pasado, éstos nos ayudarían a determinar la importancia real de las restantes causas propuestas para explicar el cambio de ritmo. En cualquier caso, los datos contenidos en las observaciones de eclipses pueden contribuir de manera significativa a resolver estos problemas clásicos de la geofísica.

Temas metamágicos

Las variaciones sobre un tema son la esencia de la imaginación

Douglas R. Hofstadter

George Bernard Shaw escribió en cierta ocasión (en *Back to Methuselah*): "Ve usted cosas, y se pregunta '¿Por qué?' En cambio, yo sueño cosas que nunca fueron; y me digo '¿Por qué no?'" Cuando por primera vez oí este aforismo me causó impresión duradera. "Soñar cosas que nunca fueron"... No es tan sólo una frase poética; es una verdad acerca de la naturaleza humana. Hasta el más lerdo de nosotros está dotado de esa extraña capacidad para construir mundos contrafácticos y soñar. ¿Por qué la tenemos? ¿De qué nos sirve? ¿Cómo es que podemos soñar, e incluso "ver" lo que no es visible, lo que no está ahí?

Sobre mi mesa descansa un cubo de Rubik. Lo miro, y veo un cubo de 3 × 3 × 3 cuyas caras son giratorias. Yo veo –así me lo parece– eso que está ahí. Otras personas, en cambio, miraron el cubo y vieron cosas que *no estaban* allí. Vieron cubos de aristas biseladas, "cubos" esféricos, cubos coloreados de mil maneras; vieron dominós mágicos, cubos de 2 × 2 × 2, cubos de 4 × 4 × 4 u órdenes todavía mayores, cubos cuyas caras giran al bies, pirámides, octaedros, dodecaedros, icosaedros y poliedros tetradimensionales. ¡Y la lista no está todavía cerrada! Más todavía, parece como si fuera imposible dar carpetazo a tan fértil tema.

¿Cómo se pudo parir tan fecunda idea? ¿Cómo es que al mirar directamente algo sólido y real, sobre una mesa, algunas personas alcanzan a ver mucho más allá de esa solidez y realidad, logrando percibir una "esencia", un "núcleo", un "tema" sobre el que idear variaciones? Tengo que subrayar que el tema no es el cubo en sí mismo (aunque sea cómodo y conveniente hablar como si lo fuese).

En la mente de todos los sujetos que perciben un cubo de Rubik nace un *concepto*, que pudiéramos llamar Rubikubicidad. Este concepto no es idéntico en todas las mentes, al igual que no todos tenemos igual concepto de los espárragos o de Beethoven. Las variaciones que al ir dándole vueltas salen despedidas de la mente de un cubo-inventor son variaciones sobre tal concepto. Al examinar el tema de la percepción y la invención, es crucial distinguir nítidamente entre el objeto y los conceptos que del objeto se forma alguien en su mente.

Ahora bien, cuando Sara Adoracubos nos aparece con una variante nueva –una versión de 4 × 4 × 4, pongamos por caso–, ¿habrá sido como resultado de haberse devanado los sesos, de esforzarse al máximo en "ir contra la veta", para ver de conseguir "algo original"? ¿Acaso piensa para sí: "Jo, Rubik ha debido quedar reventado para que se le haya ocurrido una idea tan buena y tan nueva. Así que ahora, lo que yo tengo que hacer es estrujarme los sesos, a ver si invento algo mío original"? Claro que no, Einstein no iba por el mundo torturándose la calabaza y diciendo para sí, "¿Cómo me las maravillaré para dar con una gran idea?". Lo mismo que Einstein, aunque a menor escala, Sara nunca se ve obligada a decirse, "Humm..., vamos a ver, ¿me propondré idear algún procedimiento para alumbrar una variante de ese objeto situado aquí delante de mí?". No, lo que hace, en cambio, es seguir el curso natural de sus ocurrencias.

La moraleja es que la invención se parece mucho más a caerse de un tronco que a serrarlo en dos. A pesar de la memorable observación de Thomas Edison, "El genio es un uno por ciento de inspiración y un 99 por ciento de transpiración", no todos vamos a convertirnos en genios por sudar más, ni porque tomemos la resolución de trabajar con mayor ahínco. La mente tiende a seguir la línea de mínima resistencia, y probablemente cuanto más cómoda se encuentre más creativa sea. Como solía decir Mozart, las cosas deberían "fluir como el aceite" –y seguramente Mozart sabía de qué hablaba. El juego no consiste en esforzarse más; no, el truco estriba, para empezar, en dar con el concepto idóneo, con lo que crear variaciones en torno a él será como quitarle un caramelo a un niño.

Vaya por Dios, he dejado escapar al gato. Enunciaré, pues, explícita y directamente la tesis que voy a desarrollar: la clave de la creatividad es la formación de variaciones sobre un tema.

A primera vista, tal tesis es absurda. ¿Cómo va a ser cierta? ¿No son, acaso, las variaciones meras nociones derivadas, que nunca podrán ser genuina creación original? La idea de crear un cubo 4 × 4 × 4, ¿no viene a ser como "retocar un mando" en la idea de Rubikubicidad? Basta girar el selector desde 3, que es el "ajuste de fábrica", a 4, y zas, ¡ya está! Una voz protesta en nuestro interior. Demasiado fácil. No fue así, desde luego, como nacieron la teoría de relatividad o el cubo de Rubik, ¿verdad? Cuando a un Einstein, o incluso a un Rubik, se le ocurre una gran idea, ¿no se produce una especie de "chispa mágica" que salta de un golpe el vacío entre dos puntos? Algo, por otra parte, cuya ausencia salta a la vista cuando Sara Adoracubos retoca un mando en la noción pre-existente de cubo de Rubik.

Sin duda, la idea de cubo 4 × 4 × 4 es mucho menos profunda que la inspiración que produjo la relatividad, sea general o especial. Pero ello no significa que los procesos mentales de uno y otra estén forzosamente asentados en principios diferentes del todo. Hay, desde luego, un sentido obvio en el cual los procesos mentales subyacentes al cerebro del lector, de mi cerebro, del cerebro de Sara o del propio Einstein son todos "lo mismo": todos tienen su soporte físico –su *hardware*– en el sistema nervioso. Pero cuando yo sugiero que los procesos mentales subyacentes a cerebros distintos son en algún sentido idénticos, no me estoy refiriendo a este nivel biológico y microscópico. Lo que sí pretendo decir es que hay mecanismos, procesos, llámeselos como se quiera, que admiten una descripción funcional, sin aludir al substrato neuronal que les permite tener lugar en los cerebros.

Así pues, la idea de "retocar un mando" en un concepto no guarda relación con las actividades de las neuronas cerebrales o, al menos, no ofrece una relación obvia. Pero vamos a ver, ¿hay algo de realidad en esto, o es sólo metáfora? Si algún día alcanzamos a comprender el cerebro, ¿tendremos entonces la confianza de pisar terreno sólido al decir que un cerebro *contiene* conceptos, en sentido literal? O por el contrario, ¿serán siempre estas afirmacio-



Variaciones sobre un tema: 56 variantes de la letra "A" tomadas de un catálogo reciente de Letraset USA INC.

nes endebles y metafóricas, *façons de parler*, comparadas con hechos científicos taxativos como "En la parte inferior y posterior del cerebro se encuentra el cerebelo"? Bueno, mientras términos como "concepto" no adquieran la misma legitimidad científica que, pongamos por caso, "temperatura", no nos habremos acercado a la comprensión del cerebro –al menos, no según mi libro.

Es forzoso admitir que, hoy por hoy, términos como "concepto" solamente pueden tomarse en sentido metafórico. Son términos protocientíficos, a la espera de explicación. Esta es, empero, una excelente razón para esforzarnos en descarnarlos tanto cuanto sea posible, en intentar comprender qué significa "retocar los controles" de un concepto. De quedar bien asegurado el significado de esta metáfora, podríamos saber mucho más claramente qué es lo que idealmente querríamos que una explicación "científicamente sólida" nos proporcionase.

Gracias a esta metáfora nuestra imaginación conjura la visión de un objeto tangible llamado concepto, provisto –en sentido literal– de cierta clase de mandos, que no esperan sino ser ajustados y retocados. Lo que veo con el ojo de la imaginación no es algo formado por millones de neuronas, sino más bien una especie de "caja negra" dotada de un panel de controles, cuyos botones de mando nos dicen en qué punto de su escala está ajustado cada uno.

Para concretar más esta imagen, permítaseme describir un genuino ejemplo de caja negra con controles. En los viejos tiempos de las pianolas, los buenos pianistas de la época grabaron, en los rollos perforados, maravillosas piezas de todas clases. Hoy están a la venta versiones fonográficas de aquellos rollos, reproducidos en pianola. Empero, podemos hacer algo mejor. Muchos de los mejores rollos (producidos con ayuda de un piano de tipo especial, llamado Vorsetzer) se han traducido a información digital y se han registrado en cassette; estas cintas no se reproducen a través de un magnetófono ordinario, sino en un piano equipado con un dispositivo llamado Pianocorder. El Pianocorder "lee" la cinta magnética y la traduce en instrucciones para el teclado y los pedales; nuestro piano interpreta entonces la pieza. Cada Pianocorder tiene una caja negra con una hilera de tres controles en su panel frontal ("Tempo", "Pianissimo" y "Fortissimo") y un conmutador ("Pedal suave"). Haciendo girar el mando "Tempo" podemos acelerar a Rachmaninoff; retocando los de "Fortíssimo" y "Pianissimo" se consigue que Horowitz suene aún más dulcemente o que Rubinstein imprima mayor brío. Lástima que no disponga también de un mando de "Pianista", con el que se pudiera seleccionar el intérprete. Sería interesante saltar a media pieza de un maestro a otro.

Este dispositivo nos hace avanzar un paso hacia la realización de un sueño del pianista canadiense Glenn Gould. Gould, muy inmerso en la era electrónica, ha estado durante años propugnando el empleo de ordenadores para permitir a la gente controlar la música que escucha. Se comenzaría por una grabación ordinaria de, pongamos por caso, un concierto de Mozart interpretado por el propio Gould. Tal grabación sólo serviría como "materia pri-

The LORD is my shepherd; I shall not want. He maketh me to lie down in green pastures: he leadeth me beside the still waters. He restoreth my soul: he leadeth me in the paths of righteousness for his name's sake. Yea, though I walk through the valley of the shadow of death, I will fear no evil: for thou art with me; thy rod and thy staff they comfort me. Thou preparest a table before me in the presence of mine enemies: thou anointest my head with oil, my cup runneth over. Surely goodness and mercy shall follow me all the days of my life: and I will dwell in the house of the LORD for ever.	*Yahvéh es mi pastor, nada me falta. Por prados de fresca hierba me apacienta; hacia las aguas de reposo me conduce, y conforta mi alma. Me guía por senderos de justicia, por amor de su nombre. Aunque pase por valle tenebroso, ningún mal temeré; pues junto a mí tu vara y tu cayado, ellos me consuelan. Tú preparas ante mí una mesa frente a mis adversarios; unges con óleo mi cabeza, rebosante está mi copa. Sí, dicha y gracia me acompañarán todos los días de mi vida; mi morada será la casa de Yahvéh a lo largo de los días.*

*Cada una de las letras de la transcripción inglesa del Salmo 23 creada por el sistema Metafont de Donald E. Knuth pertenece a distinta fuente tipográfica. (**A la derecha**, versión española según la Biblia de Jerusalén.)*

ma" sobre la que manipularía usted. En la era espacial, el tocadiscos podría muy bien disponer de un grupo de mandos que permitieran frenar o acelerar la música a voluntad, controlar el volumen de cada sección de la orquesta, e incluso corregir los agudos de los violines. En efecto, de esta forma se convertiría usted en el director, al disponer de mandos para controlar dinámicamente cada aspecto de la interpretación. El hecho de ser Gould quien inicialmente tocase el piano resultaría, cuando usted hubiese terminado, indiferente. Para entonces ya habrá usted tomado las riendas y convertido en propia la interpretación. Presumiblemente, un sistema así continuaría evolucionando hasta poder atacar la partitura escrita, prescindiendo de la etapa de grabación acústica.

¿Y por qué quedarnos aquí? Si estamos dispuestos a fantasear, ¿por qué no ir tan lejos como podamos imaginar? ¿Por qué habrían nuestras materias primas de limitarse al universo finito de obras existentes? ¿Por qué no habríamos de tener un mando para controlar el talante de la composición y otro para regular el estilo del compositor que la escribe? Podríamos así disponer de piezas del carácter que deseásemos del estilo de nuestros compositores favoritos. Pero también ahora nos estamos mostrando demasiado conservadores. ¿Por qué limitarnos al universo-finito de compositores ya nacidos? ¿Por qué no disponer también de un mando para interpolar entre dos compositores, con lo que podríamos sintonizar nuestra máquina musical para producir combinaciones promediadas de Johann Sebastian Bach, Giuseppe Verdi y John Philip Sousa (¡uf!), o situarla a medio camino entre Franz Schubert y los Sex Pistols (¡super-uf!)? ¿Y por qué detenerse en la interpolación? ¿Por qué no extrapolar, yendo más allá de un compositor determinado? Por ejemplo, yo pudiera desear una pieza del compositor "que es a Ravel como Ravel es a Chopin". La máquina tan sólo necesitaría calcular las razones de los ajustes de sus mandos correspondientes a Ravel y Chopin, y después de aplicar los coeficientes así calculados a Ravel, para producir un super-Ravel.

Verdaderamente, la dificultad no es mayor que la planteada por cualquier analogía trivial: "¿Qué es a un triángulo lo que un triángulo es a un cuadrado?", "¿qué es a Grecia lo que Gibraltar es a España?" y otros problemas fáciles del mismo estilo. La realidad es, evidentemente, muy contraria. Los problemas de analogía son extraordinariamente difíciles y delicados de mecanizar. En la gran mayoría de conceptos los mandos no están tan a la vista que podamos leer directamente a qué valores están ajustados. Los ejemplos anteriores sirvieron sólo para llevar un pensamiento a extremos ridículos. No obstante, sí vale la pena considerar seriamente que un concepto puede asimilarse a una máquina cuyos mandos podemos ir ajustando y con la que producir una gama fabulosa de variaciones.

Situando en 3 el mando de control de "orden", el concepto de cubo de Rubik produce un cubo ordinario de $3 \times 3 \times \times 3$ (el cubo de orden 3); con el control situado en 4 resultaría un cubo de $4 \times 4 \times 4$. Puestos a pensar en ello, ¿no deberíamos tener un mando individual para cada dimensión, para poder elegirla con independencia de las demás? Después de todo, no es forzoso que todas las variantes hayan de ser cúbicas. El dominó mágico es de $3 \times 3 \times \times 2$. Si convenimos, pues, en que haya *tres* mandos para definir la forma, lo que ocurre es que en el cubo ordinario los tres tomaron casualmente el mismo valor. Ahora bien, dados estos controles podemos valernos de nuestro concepto –nuestra máquina provista de botones de mando– para ir generando objetos mentales tales como cubos de $7 \times 7 \times 7$, dominós mágicos de $2 \times \times 2 \times 8$, e incluso un ladrillo mágico de Rubik (Rubikrillo) de $3 \times 5 \times 9$, y perdón por la irreverencia.

¡Un momento! Con sólo tres mandos quedamos encerrados en tres dimensiones. Y, evidentemente, no es eso lo que deseamos. Añadamos pues un cuarto mando para controlar la longitud en el sentido de la cuarta dimensión. Con su ayuda podremos formar ahora Rubikrillos tetradimensionales como el de $2 \times \times 3 \times 5 \times 7$, además de cualquier otro engendro Rubik-undo que pudiera antojársenos. Aunque es inútil decirlo: una vez traspasadas las puertas de la tercera a la cuarta dimensión, deberíamos sentirnos con fuerzas para ir más lejos. Podríamos imaginar objetos de Rubik n-dimensionales para valores de n arbitrariamente grandes, por ejemplo, el Hiper-rubikrillo de $2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8$. Mas ahora ha ocurrido algo curioso: tenemos que concebir nuestra máquina –nuestro concepto– como dotada de un número potencialmente *ilimitado* de mandos, uno para cada dimensión del espacio n-dimensional. Situando el mando de n en la posición 3 sólo necesitaremos tres mandos más. ¡Pero si n se toma igual a 100 harán falta otros cien mandos!

Ninguna máquina real tiene un número variable de mandos y controles. Puede parecer ésta una observación trivial, pero las aguas a que conduce son traicioneras. La clave está en que, si queremos seguir valiéndonos de la metáfora que asimila a los conceptos con máquinas provistas de controles, tendremos que ampliar el concepto mismo de "mando de control". Se hace preciso admitir que puedan materializarse nuevos mandos, según sea la posición en que se encuentren otros. O si se prefiere, podemos imaginarlo así: en cada concepto hay, en potencia, una infinidad de mandos, y en cada momento pueden quedar al descubierto nuevos botones y palancas a resultas de como hayan sido ajustados los otros.

No estoy, sin embargo, seguro de que me agrade esta idea. Es demasiado estereotipada, demasiado cerrada y predeterminada para mi gusto. Estoy más a favor de la opinión de que los "mandos" de un concepto dependen del grupo de conceptos que se encuentren simultáneamente activos en la mente de una persona. De esta forma pueden cobrar existencia nuevos mandos en apariencia surgidos de la nada; no es preciso que se encuentren todos presentes desde el principo en cada concepto aislado. Volviendo a Rubik, esto significaría que el concepto que *él* tuviera de su cubo no incorporaba explícitamente (y todavía no lo hace, tal vez ni siquiera implícitamente) todas las posibles variantes que pueden ir ocurriéndosele a la gente. Rubik pudo prever, e incluso diseñar por sí mismo, muchos de los objetos que han ido subsiguientemente apareciendo, que nosotros percibimos como variaciones sobre el tema, pero su mente no logró agotar un idea tan fértil. En cuanto su concepto pasó a ser dominio público comenzó a desarrollarse en formas que Rubik nunca hubiera sospechado.

Los conceptos tienen una forma peculiar de deslizarse, de ir corriéndose de uno a otro siguiendo caminos totalmente impredictibles. Quizá sea este deslizarse lo que nos consienta las visiones más profundas de la oculta naturaleza de nuestras redes conceptuales. En ocasiones, el corrimiento es accidental, como sucede con las erratas de imprenta o las faltas de ortografía, o cuando por mala elección de nuestras palabras decimos un despropósito o damos pie a un malentendido. Otras

veces el error no es accidental, sino emanación directa de nuestro inconsciente. Al decir que es "no accidental" no pretendo decir que sea intencionado. No es que nos digamos a nosotros mismos: "Me parece que será buen momento para deslizarme desde un concepto a una de sus variaciones", pues tal tipo de deslizamiento es deliberado y consciente, y casi siempre estéril. Libros del estilo "Cómo pensar", "Cómo ser creativo", e incluso obras tan buenas y meditadas como *How to Solve It* (versión española, "Cómo plantear y resolver un problema") de George Pólya son, por esta razón, de pobre utilidad al candidato a genio.

Por extraño que pueda parecer, nuestros procesos mentales, nuestros pensamientos, están empapados de este deslizamiento involuntario y no accidental, que es –así lo creo yo– su corazón mismo. La fabricación inconsciente de variaciones subjuntivas de un tema es algo que prosigue noche y día en cada uno de nosotros, por lo común sin que tengamos de ella noticia alguna. Es una de esas cosas que, lo mismo que el aire, la gravedad o la tridimensionalidad, tienden a eludir nuestra percepción, estando como están nuestras vidas tejidas con ellas.

Para concretar este punto, permítaseme contrastar un ejemplo de deslizamiento "deliberado" con otro "no deliberado y no accidental". Imagine que una tarde de verano Sara Adoracubos y usted acaban de entrar en una cafetería increíblemente abarrotada. A partir de ahí prosiga usted; fabrique unas cuantas variantes de la escena, con toda la libertad que desee. ¿Qué clase de cosas se le ocurren cuando deliberadamente "desliza" usted esta escena hacia variantes de sí misma?

A casi todo el mundo se le ocurrirían variantes bastante obvias, construidas por deslizamiento a lo largo de lo que podríamos llamar "ejes naturales de corrimiento". Ejemplos típicos son:

Pudo haber sido una tarde de invierno, y no de verano.

Pudo haber ido usted con Adán Odiaesferas en lugar de Sara Adoracubos.

Pudieron ustedes haber ido a un restaurante en lugar de a una cafetería.

La cafetería pudiera estar casi vacía.

Compare usted ahora las variantes que haya podido construir con esta que oí por casualidad a una pareja recién entrada en una repleta cafetería, el verano pasado. Dijo el hombre a su acompañante: "Me alegro de no ser yo esta noche camarera de este sitio". Es éste un ejemplo perfecto de variante subjuntiva acerca del tema dado, pero a diferencia de las suyas surgió espontáneamente y para ser comunicada. La lista anterior resulta rematadamente vulgar y desangelada junto a esta otra observación casual. Que la chica no consideró particularmente aguda ni graciosa. En un esfuerzo de elocución, ella alcanzó a decir "¡Psé!". Y si a mí me llamó la atención fue menos porque me pareciera ingeniosa que por encontrarme yo siempre alerta, en búsqueda de ejemplos interesantes de deslizamiento.

Encontré este ejemplo no leve, sino extraordinariamente sugestivo. Al intentar analizarlo sentimos la impresión de estar obligados, en tanto que oyentes, a imaginar una operación de cambio de sexo ejecutada en tiempo récord. Pero cuando nos limitamos a *comprender* el mensaje, vemos que, en realidad, en la mente del hablante no había intención de evocar tan estrafalaria imagen. Su observación era mucho más figurativa, mucho más abstracta. Se basaba en una percepción instantánea de la situación, que induce, deslumbrante, un pensamiento: "Me basta ser humano para poder ponerme en el lugar de esa camarera; por consiguiente, yo *pudiera haber sido* ella". Lógicos o no, así son nuestros pensamientos.

Por tanto, cuando se observa con atención se aprecia que este pensamiento particular no tiene prácticamente relación con el hablante y, ni siquiera, con la camarera que él ve. No es más que una manera frívola de decir, "¡Jo, sí que hay gente esta noche!". Y por eso, claro, su observación no causa ningún impacto. No obstante, el comentario sí fue hecho en modo tal que nos invita a superponer las imágenes que nos hacemos del hablante y de la camarera, sin apenas fijarnos (si es que llegamos a darnos cuenta) en la diferencia de sexo. ¡Qué asombroso y sutil proceso mental está implícito aquí! Y lo que aún me resulta más estupefaciente (y frustrante) es ver cuán difícil se hace explicar a otros lo muy sorprendente que es. A la gente le cuesta muchísimo captar todo lo que de asombrosa tiene la conducta ordinaria de las personas. A muy duras penas logran imaginar que tal conducta pudiera haber sido otra. Es difícil deslizarse mentalmente hacia el seno de un mundo donde la gente *no* pensara a base de deslizarse mentalmente hacia otros mundos; es difícil, muy difícil, crear mentalmente un mundo contrafáctico donde los contrafácticos no fueran ingredientes clave del pensamiento.

He aquí, brevemente, un segundo ejemplo. Estaba yo conversando con una persona, que me dijo haber nacido en una población de Indiana llamada Whiting, y como yo no sabía dónde se encontraba esa ciudad, me explicó que estaba cerca de Chicago, añadiendo, para más datos, "Whiting pertenecería a Illinois si no fuera por la línea fronteriza". Como antes, se trataba de un comentario inocente; no tenía ninguna pretensión de ser una agudeza. Ni él ni yo nos reímos; yo me limité a sonreír, para darle a entender que me hacía cargo, y proseguimos la conversación. ¡Pero veamos de analizar el significado de la observación! A nivel lógico es más o menos tautológica. Qué duda cabe: Whiting estaría en Illinois si la frontera interestatal así lo definiera. Pero claro, si corremos la línea para que abarque a Whiting, ¿por qué no hacerla llegar hasta Toronto y, ya puestos, hasta Pekín? En cambio, a nivel psicológico el comentario sí tiene sentido, apoyándose implícitamente en alguna intuición mutuamente compartida acerca de la mudabilidad y arbitrariedad de las fronteras geográficas, de una intuición de que las fronteras interestatales pueden, efectivamente, desplazarse. Ni se nos pasaría por la cabeza, salvo en declaraciones como la que nos ocupa, desplazar la frontera estatal de Illinois hasta Pekín. Sin embargo, así *ocurrió* espontáneamente en la mente de mi interlocutor. Se revelaban de esta forma algunas cualidades profundas de su representación mental de Whiting.

Observaciones como ésta delatan las "líneas de fractura" ocultas de la mente; nos muestran qué cosas pueden experimentar deslizamiento y cuáles no. Y no obstante, nos revelan también que no hay nada en cuya indeslizabilidad podamos verdaderamente confiar. El contexto aporta una inesperada cualidad a los controles que sobre un determinado concepto pueden percibirse. Los "mandos" no están pulcramente alineados sobre un tablero de control, no son fijos e invariables. Antes bien, al ir cambiando el contexto vamos como dando la vuelta en torno al concepto, y conforme vamos viéndolo desde diversos ángulos se nos revelan más y más controles. Algunas personas llegan a tal maestría en la percepción de nuevos controles que logran observarlos donde otros creyeron que no había ninguno, lo mismo que algunos son capaces de hallar setas en lugares del bosque donde otros no vieron ninguna.

Aún así, puede todavía resultar tentadora la idea de que para cada concepto debe existir un conjunto "definitivo" o "absoluto" de controles tales que cada "punto" del espacio abstracto, definido por todas las posibles combinaciones de los controles, sea una posible instancia particular del concepto. Tenemos un caso pertinente en el concepto de letra *A*. Los tipográficamente más ingenuos pudieran creer que hay sólo cuatro o cinco mandos donde trastear. Sin embargo, cuanta más atención se presta a las formas de las letras tanto más escurridizas resultan al querer definirlas matemáticamente. Uno de los más valerosos esfuerzos de "poner mandos" en el alfabeto ha sido un sistema generador de caracteres llamado Metafont, puesto a punto en Stanford por Donald E. Knuth.

El objetivo de Knuth no es llegar a una definición matemática y definitiva de los caracteres del alfabeto (tengo la impresión de que semejante idea le haría reír), sino permitir al usuario del sistema disponer de "controles" sobre las formas de sus letras, que aquí llamaremos "esquemas literales". Ello significa poder decidir por sí mismo cuáles van a ser los rasgos variables de los caracteres, para después, con la ayuda del Metafont, idear fácilmente controles que permitan actuar sobre tales rasgos. Podríamos incluir aquí prácticamente todo cuanto se nos pudiera ocurrir: las longitudes de las líneas en las letras, los engrosamientos y esfumados de las líneas, la forma de las curvas, la inclusión o eliminación de bigotillos y florituras, etcétera. Toda la potencia del ordenador queda entonces a nuestra disposición; podremos retocar y perfilar al dictado de nuestros corazones, y el ordenador irá generando todos los productos que nuestros controles le definan.

No conformándose con ir tratando individualmente las figuras de las letras, Knuth ha conseguido que las letras puedan *compartir* parámetros. Es decir, un solo "control maestro" es capaz de comandar rasgos comunes a grupos de letras relacionadas. Por tanto, aunque puedan controlarse centenares de aspectos, al contar los mandos de todos los paneles de control de todos los caracteres alfabéticos se verán muchos menos "mandos maestros", cuya influencia sobre el abecedario entero es profunda y penetrante. Lo que sucede, en efecto, es que basta ir retocando únicamente los controles maestros para poder ir plácidamente a la deriva, de crucero a través de un "espacio" de tipos de imprenta.

Entre las proezas de Knuth como "virtuoso" del Metafont, tal vez ninguna como su trabajo con el Salmo 23, que en inglés consta de 593 caracteres (contados también los espacios). Knuth había definido un juego completo de caracteres, que compartían 28 mandos maestros. Comenzó su versión impresa del salmo con todos los controles girados a tope hacia la izquierda. Después, carácter por carácter, fue muy lentamente llevándolos hacia el tope derecho, haciéndolos girar cada vez 1/592 del arco total, de forma que al llegar al último de los caracteres a imprimir se alcanzaba también el extremo derecho del espectro. En cierto sentido cada letra del salmo pertenece a un juego tipográfico distinto. Y sin embargo, la transición es tan suave que es localmente indetectable. Este ejemplo ha sido tomado de un sugestivo artículo de Knuth, "The Concept of a Meta-Font" (*Visible Language*, vol. 16, n.º 1, págs. 3-27; invierno de 1982).

Una de las principales tesis de Knuth es que con ayuda de los ordenadores nos encontramos en situación de poder no sólo describir las cosas por sí mismas, sino cómo esas cosas *podrían ir variando*. Metafont es epítome de tal tesis. En cierto sentido podría decirse que el ordenador, más que reproducir ciegamente tipos de letra, tiene una "comprensión" –por burda que sea– de lo que está dibujando, creada por el diseñador que "puso controles" a los caracteres. Y no obstante, es preciso tener cuidado de no caer en la ilusión –fácilmente creada por la extraordinaria potencia del Metafont– de que estos 28 controles maestros (o cualquier otro conjunto finito de mandos) puede realmente controlar la totalidad del "espacio" de posibles caracteres tipográficos. Ello dista de la verdad más o menos lo mismo que distaría la afirmación de que es posible capturar en un programa de ordenador toda la riqueza de matices de los rostros humanos graduando sólo 28 controles.

Más aún, apenas si el subespacio de posibles versiones de letra *A* es someramente explorado cuando se retocan *todos* los controles de la representación de la *A*, es decir, no sólo los 28 controles maestros que comparte con las otras letras, sino también los muchos controles "particulares" con que cuenta esta letra. Ni siquiera 1000 mandos bastarían para cubrir la diversidad de trazados de la *A* que las personas logran reconocer sin dificultad. En la página 107 se dan algunos ejemplos de la riqueza del espacio tipográfico de la letra *A*.

Es preciso hacer aquí una distinción esencial. Una máquina que tuviera una llave de "encendido" (que es el mando más elemental) individual para cada una de las cuadrículas de un retículo de 200 × 200 permitiría sin duda definir cualesquiera de las *A* mostradas, pero eso no impediría que retocando los mandos no aparecieran también imágenes de la *B*, de la *Z* o de mi abuelita. La cuestión de definir un sistema de controles que por distinta graduación pueda engendrar todas las *A* que vemos, más todas las interpolaciones entre ellas (así como todas las extrapolaciones en todas las direcciones posibles), y todo ello sin hacernos salir del espacio de *A* es reconocibles, es cosa totalmente distinta, y enormemente más complicada. Análogamente, el proyecto de preparar un programa de ordenador capaz, en principio, de escribir todas las sucesiones y combinaciones posibles de tonos, en todas las pautas rítmicas posibles, es empresa casi trivial; pero la distancia que lo separa de un programa hipotético, capaz de producir únicamente piezas reconocibles "como de Bach", no es, desde luego, un tiro de piedra. La imposición de las restricciones necesarias dificulta el programa hasta lo indecible.

Lo que Metafont nos da, más que el espacio completo de todos los diseños posibles de la *A*, es un *subespacio*, cuyos elementos están por otra parte tan estrechamente emparentados que quizá fuera mejor llamarlo *familia*. Nadie podrá predecir la existencia de mariposas habiendo estudiado antes sólo hormigas, avispas y escarabajos. Por lo mismo, nadie podría predecir la magnitud plena del *concepto* de *A* basándose en la familia descrita por la variación del número finito de mandos de cualquier programa Metafont verosímil correspondiente a la *A*.

Dejado atrás el Metafont, la etapa siguiente habrá de ser un programa capaz de extraer por sí mismo un sistema de controles a partir de un conjunto tipográfico de entrada. Este programa habrá, no obstante, de aguardar hasta un futuro bastante lejano. Por el momento, un diseñador tipográfico perceptivo y altamente cualificado necesita meses para transformar un juego de diseños de letra en programas Metafont lo suficientemente flexibles como para que el esfuerzo realizado haya valido la pena. Sería relativamente fácil hacerlo burda y mecáni-

camente, pero lo que se desea es conservar la unidad de estilo incluso al ir retocando los mandos maestros. Por consiguiente, la tarea de mecanizar programas Metafont viene a ser la de mecanizar la percepción del artista. No está la solución a la vuelta de la esquina.

Hay una curiosa obra titulada *One Book Five Ways* ("Un libro, cinco versiones"), publicada en 1978 por William Kaufmann, Inc. La cosa fue como sigue. Como experiencia educativa sobre metodología editorial comparada, un mismo manuscrito sobre jardinería de interior fue enviado a las prensas de cinco universidades. Todas ellas se avinieron a publicar versiones íntegras del libro, que resultó asombrosamente diferente a todos los niveles imaginables. William Kaufmann tuvo la brillante idea de publicar, una junto a otra, partes de las diversas versiones; el resultado fue este elegante "metalibro", que acierta de lleno a hacernos comprender que hay más de una manera de desollar un gato.

La confección del libro fue una extravagante incursión en "otros mundos" posibles; una de esas cosas que nos parecen muy difíciles. Sin embargo, una de las tesis de Knuth es que conforme los ordenadores vayan divulgándose y haciéndose más complejos, la idea de desollar el gato de 10 maneras distintas irá pareciéndonos cada vez menos extravagante. Una vez que el "gato" haya quedado representado por un potente programa, ya no será un mero "gato"; será un "esquema gatuno", un molde donde verter muchos gatos diferentes, a todos los cuales podrá usted pelar de distintas maneras (al menos, mientras al esquema gatuno le queden vidas).

La determinación de la forma y tamaño de los textos y composición tipográfica de los mismos por medio de ordenador nos permite disponer fácilmente de muchas alternativas para un mismo fragmento. El Metafont nos hace ver cómo las formas de las letras pueden ir deslizándose hacia alternativas de sí mismas. De nosotros depende seguir adelante con estas tendencias hacia la ampliación de nuestras capacidades para ver más lejos, profundizando en el espacio de posibilidades que rodean cuanto *es*. Deberíamos valernos de la potencia de los ordenadores como ayuda para ver el concepto en toda su plenitud –la "esfera implícita de hipotéticas variantes"– que se halla en torno a una percepción estática, petrificada.

He ideado un nombre para esta esfera imaginaria. La he llamado "esferímplica", condensación de "esfera implícita contrafáctica", aludiendo así a cosas que nunca han sido, pero que de todas formas no podemos dejar de ver. (El término puede significar también la esfera de implicaciones que envuelven cualquier idea dada.) Si queremos enrolar a los ordenadores como socios en esta empresa de inventar variaciones sobre un tema, es decir, de volver las esferímplicas en esferóxplicas, tendremos que dotarlos de la capacidad para localizar por sí mismos los controles, y no sólo de aceptar aquellos que nosotros los humanos hayamos podido detectar. Será preciso para ello examinar profundamente la noción de deslizabilidad, observar la estructura fina de tales redes de conceptos en la mente humana.

Una forma de imaginar cómo podría materializarse en la mente esta noción de deslizabilidad o corrimiento es suponer que cada concepto cobra vida como compuesto de conceptos previos, y que de la deslizabilidad de estos conceptos hereda a su vez cierto grado de deslizabilidad. Es decir, como cualquiera de sus ingredientes puede deslizarse de varias formas, quedan inducidos en el todo diversos modos de deslizabilidad. Por lo general, es suficiente dejar que los conceptos componentes se deslicen en las más sencillas de sus formas, pues cuando se producen simultáneamente dos o más corrimientos pueden crearse muchos efectos secundarios inesperados. Gradualmente, conforme se va explorando el espacio de posibilidades –la esferímplica– del nuevo concepto, los deslizamientos más corrientes y útiles van quedando más y más íntimamente ligados al concepto nuevo como atributos, en lugar de tener que deducirse una y otra vez a partir de los ingredientes de aquél. De esta manera, la esferímplica de nuevo concepto va describiéndose más y más explícitamente. Al cabo, el concepto pasa de nuevo a viejo, alcanzando un punto en que es posible emplearlo a su vez como ingrediente de conceptos nuevos, frescos y jóvenes.

En la sección de "Temas metamágicos" de noviembre de 1981 se presentaron ya algunos ejemplos de esta índole. Aunque noviembre casi es diciembre, y 1981 casi es 1982, quizás el lector no los tenga en la yema de los dedos de su mente, o mentalmente en la punta de la lengua. Permítame, pues, presentarle unos cuantos ejemplos más de deslizamiento de una noción nueva basados en el deslizamiento de algunos de sus componentes en algunas de sus formas más sencillas. La noción que he elegido es la que toma al lector, sentado donde está, leyendo esta sección en este mismo momento. He aquí algunos elementos de la esferímplica de tal concepto:

Casi está usted leyendo el número de noviembre de 1981 de *Investigación y Ciencia*.

Casi está usted leyendo un artículo de Richard Hofstadter, historiador.

Casi está usted leyendo la sección de Martin Gardner.

Este artículo que está usted leyendo casi está en francés.

Casi está usted leyendo mi libro *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*.

Casi es usted quien escribe esta sección.

Yo estoy casi hablándole a usted.

Llegados a este punto, el concepto original se encuentra casi perdido en un mar de variaciones del tipo "casi..."; pero esta exploración lo ha enriquecido, y cuando usted regrese al concepto original lo hallará mucho más objetivado como concepto independiente, más como una entidad única que como un compuesto. Al cabo de un tiempo, con circunstancias desencadenantes oportunas, este mismo ejemplo puede recobrarse de la memoria con tanta naturalidad y tan pequeño esfuerzo como lo es el concepto de "pez".

Tenemos aquí una idea importante: el criterio para reconocer si un concepto ha llegado a ser, la verificación de su genuina existencia mental está en la posibilidad de recobrarlo por este proceso de rememoración inconsciente, que le hace saber a usted que el concepto ha enraizado firmemente en el campo de cultivo de su mente. No se trata de que el concepto se presente como un "átomo", en el sentido de que se disponga de una palabra suficiente para expresarlo. Eso sería demasiado superficial.

Veamos un ejemplo que revele por qué. Hace poco, un amigo me explicaba que la primera edición de la *Encyclopaedia Britannica* constaba de tres volúmenes. El volumen I estaba dedicado a las letras *A* y *B*. El volumen II recogía desde la *C* hasta la *L*, y el volumen III, el resto del abecedario. ¡La letra *A* recibía 511 páginas, mientras toda la sección *M-Z* recibía, en conjunto, 753! Esta graciosa anécdota provocó inmediatamente en mí la evocación de otro recuerdo implantado hace años en mi mente, en circunstancias de las que no tengo memoria, relativo a la preparación de discos fonográficos allá por

los tiempos en que por no existir cintas magnetofónicas el disco patrón tenía que grabarse "en directo". Los intérpretes iban tocando o cantando, hasta que, de pronto, el ingeniero de grabación se daba cuenta de que en el disco quedaba poco espacio y hacía a los intérpretes señas de que se dieran prisa. En consecuencia, conforme la aguja se acercaba al centro del disco, el *tempo* se iba haciendo más rápido. A mí me parece obvio que un concepto desencadenó la evocación del otro. Pero volvamos a preguntárnoslo, ¿por qué es obvio?

A nivel de superficie, ambos conceptos no guardan relación mutua alguna. Uno se refiere a impresión, libros, alfabeto,..., mientras que el otro nos habla de discos de cera, sonidos, intérpretes, técnicas de registro sonoro, etcétera. Y sin embargo, a cierto nivel conceptual más profundo se trata en realidad de una misma idea. Tenemos aquí una y sólo una idea, a la que bautizaré esqueleto conceptual. Esforcémonos en expresarla verbalmente. Ciertamente, con una palabra no nos basta. Nos va a costar pensarlo un momento. Y cuando terminemos por dar con una frase, lo más probable es que sea una frase desmañada o ampulosa –y aún así, no del todo exacta.

Los dos ejemplos citados de esqueleto conceptual –en sí mismos anónimos, mayestáticamente innombrables– flotan de acá para allá en las esferímplicas que los rodean, juntamente con otros numerosos ejemplos de los que no tengo conciencia, por no haber trasteado suficientes (ni suficientemente) los mandos de control de este concepto. Ignoro, desde luego, cuáles sean incluso los mandos que tiene, aunque pudiera descubrirlos. La tesis es que el concepto mismo ha sido reificado, cosificado, ha adquirido existencia real, transformándose de abstracción en cosa. Que así ha sucedido lo demuestra el que ahora actúe como punto de referencia inmediata, al que en circunstancias adecuadas mis mecanismos de memoria son capaces de acceder de forma directa. Carecemos igualmente de palabras para la mayoría de nuestros conceptos, aunque sin duda podemos hacer el esfuerzo de verbalizarlos cuando tenemos necesidad.

Al principio de este artículo enuncié una tesis: que la clave de la creatividad reside en la capacidad para elaborar variaciones sobre un tema. Llegado aquí confío en haber descarnado y mondado suficientemente esta tesis como para hacer comprender en toda su riqueza mi intención al decir "variaciones sobre un tema". La noción engloba controles, parámetros, deslizabilidad, condicionales contrafácticos, subjuntivos, situaciones "casi...", esferímplicas, esqueletos conceptuales, rememoración y mucho más.

Quizás en su espíritu subsista la cuestión. ¿No son acaso triviales las variaciones sobre un tema, en comparación con la creación del tema mismo? Cuestión que seductoramente nos hace replantearnos si Einstein y otros potentes creadores estaban o no cortados de paño diferente al de los mortales ordinarios o, al menos, si ciertos actos cognitivos de tales creadores implican principios que trascienden de alguna forma de los ordinarios. Yo no lo creo así en forma alguna. Si observamos, por ejemplo, la historia de la ciencia, veremos que cada idea ha sido construida a partir de un millar de ideas anteriores, emparentadas con ella. Un análisis cuidadoso nos lleva a ver que lo que llamamos tema nuevo es siempre, a nivel profundo, variación de algún tipo de temas anteriores.

Newton decía que si pudo ver más lejos que otros fue porque estaba subido a hombros de gigantes. Empero, con demasiada frecuencia nos dejamos llevar de ideas ilusorias, imaginando que las creaciones brillantes o hermosas se han debido a inspiraciones mágicas, trascendentes e irreductibles al análisis, y no a mecanismo alguno, como si todos los mecanismos, por su naturaleza misma, hubieran de ser someros y triviales.

Mi propia imagen mental del proceso creativo comporta comprender la organización de la mente como formada por miles, cuando no millones, de esferímplicas traslapadas e interfirientes, en el centro de cada una de las cuales hay un esqueleto conceptual. Las esferímplicas son entes efímeros, titilantes; algo así como las nubes electrónicas, de escurridiza indeterminación cuántica, que envuelven los núcleos atómicos. Si el lector ha estudiado química cuántica sabrá que la mejor manera de comprender la fluida naturaleza de los enlaces químicos es a partir de la curiosa superposición espacial de funciones de onda electrónicas, funciones de onda pertenecientes a electrones que circundan átomos vecinos. De forma análoga, a modo de metáfora, a mi me parece que las absurdas e inesperadas asociaciones de ideas que dan pie a que afloren –al parecer, surgidas de la nada– intuiciones creadoras pudieran ser muy bien consecuencia de una "química conceptual" semejante, con sus tipos específicos de "enlace", consecuencia a su vez de una "mecánica neuronal" subyacente.

El novelista Arthur Koestler ha sido, desde hace mucho, uno de los campeones del enfoque místico de la creatividad humana, defensor del enfoque ocultista mientras, al mismo tiempo, describe con elocuencia y objetividad su funcionamiento. En su libro *The Act of Creation* presenta Koestler una teoría de la creatividad, cuyo concepto clave él llama *bisociación*: activación e interacción simultánea de dos conceptos previamente desconectados. Tal enfoque subraya la llegada simultánea de *dos* conceptos, pasando por alto el análisis y discusión de la estructura interna de los conceptos por sí solos. Lo que está de acuerdo con la que parece ser convicción de Koestler, a saber, que el todo es de alguna forma mayor que la suma de sus partes.

Por lo que a mi concierne, he estado subrayando, por contra, la idea de estructura interna de los conceptos. Desde mi punto de vista, la forma en que los conceptos pueden encadenarse y constituir moléculas conceptuales de todos los niveles de complejidad es consecuencia de su estructura interna. La clave de la cuestión está en la estructura interna de los conceptos individuales, y en cómo el concepto se "expande" hacia cosas que no es. No soy yo quien cree que las totalidades escapan a descripción en términos de sus partes. Si llegásemos a comprender la "física de los conceptos", tal vez pudiéramos después deducir una "química de la creatividad", al igual que podemos deducir los principios químicos de las leyes de la física. No es cosa que esté a tiro de piedra. Las palabras de cauto entusiasmo escritas por Alan Turing siguen hoy siendo tan oportunas como lo eran en 1950, cuando las puso como colofón de su famoso artículo "Computing Machinery and Intelligence": "Solamente podemos ver hacia delante un corto trecho, pero en él sí podemos ver lo mucho que hay que hacer".

Leí por casualidad hace poco un titular de una conocida revista de electrónica que proclamaba en uno de sus titulares algo así como CHIPS THAT SEE (Microcircuitos capaces de ver). ¡Por Dios! Yo empezaré a creer en semejantes maravillas en cuanto los microcircuitos empiecen a ver cosas que nunca fueron y a preguntarse, "¿Y por qué no?".

Taller y laboratorio

Interioridades del "bamboleo", movimiento que singulariza a las monedas y cilindros

Jearl Walker

Cuando ponemos de canto una moneda sobre una superficie lisa y le aplicamos una pulgarada enérgica, empieza a girar verticalmente. No dudará así mucho, en seguida bambolea y se inclina hasta que, acompañada de un sonsonete de frecuencia creciente, cae tumbada sobre el tablero. Cualquier objeto cilíndrico, una botella por ejemplo, puede someterse a bamboleo sobre su base; ahora bien, salvo que este movimiento sea tan vigoroso que provoque su caída, el objeto acabará quedándose derecho. No necesitamos un gran aparato experimental para descubrir secretos interesantes del comportamiento de esos objetos y de los factores que determinan que concluyan por caerse o "aguanten el tipo". Este artículo se basa en los trabajos de Lorne A. Whitehead y Frank L. Curzon, de la Universidad de Columbia Británica, de próxima publicación en el *American Journal of Physics*. Whitehead ha ideado un dispositivo para analizar este fenómeno y ha abordado su estudio matemático. Me he servido también de los trabajos originales de Martin G. Olsson, de la Universidad de Wisconsin en Madison.

El bamboleo presenta tres características fundamentales. En primer lugar, es periódico. Segundo, el objeto rueda sin deslizar en torno a su base. Tercero, el centro de masa del objeto se desplaza paulatinamente hacia abajo, aunque apenas se traslada en horizontal, a menos que se haya puesto a bailar con escasa habilidad.

Que dure un movimiento de bamboleo débese a que son mínimas dos pérdidas de energía. Por un lado, la falta de deslizamiento rebaja la energía perdida por roce entre el objeto y la superficie sobre la que éste gira; por otro, la ausencia de vibración del centro de masa y del punto de apoyo elimina pérdidas adicionales de energía.

En la ilustración superior de la página 118 se indican las características principales de un objeto en bamboleo. Este se halla en contacto con la superficie de apoyo en un solo punto y posee un eje de simetría longitudinal que habitualmente forma cierto ángulo con la vertical. Entonces, el objeto gira en torno a dicho eje de simetría y éste, a su vez, da vueltas en torno a la vertical. De ese modo, como el centro de masa no se mueve mientras el objeto da vueltas, el fondo de éste rueda describiendo un círculo centrado en el eje vertical que pasa por su centro de masa. Se trata de una precesión, movimiento familiarmente observable en el baile de los trompos.

La fuerza generadora de la precesión aparece en el punto de contacto del cuerpo con la superficie sobre la que evoluciona. La gravedad atrae a todas y cada una de las partículas que constituyen nuestro objeto, cuyo peso total puede suponerse aplicado en el centro de masa. Entonces, si el cuerpo no estuviese girando alrededor de su eje de simetría, la atracción gravitatoria actuante sobre su centro de masa lo tumbaría.

Habitualmente, toda fuerza produce en un cuerpo una aceleración de su misma dirección y sentido; mas si actúa sobre un cuerpo en rotación, provoca en éste un momento de giro, que lo hace rotar. En el caso de un objeto en bamboleo, el momento de giro crea la precesión. Ante una velocidad de rotación demasiado baja o demasiado alta para que el objeto ruede sin deslizarse, el rozamiento incrementa rápidamente la velocidad de giro hasta que cesa el deslizamiento.

El efecto que en realidad ejerce el momento de giro consiste en cambiar la dirección del momento cinético del objeto en bamboleo. Esta cantidad resulta del producto de un valor numérico que da cuenta del modo en que está distribuida la masa del cuerpo (y que se llama momento de inercia) por la velocidad de giro. El momento cinético puede representarse, además, mediante un vector que yazga en un plano vertical imaginario que contenga al eje de simetría en torno al que gira el objeto en su bamboleo; así, al rotar en torno al eje vertical que pasa por el centro de masa, dicho vector describe un cono imaginario. Y, por otra parte, el eje de simetría dará vueltas asimismo alrededor de la vertical. Ahora bien, a falta de gravedad y del momento de giro que la misma genera, todo objeto podría hacerse girar sin precesión; en cuyo caso, el bamboleo sería imposible.

La velocidad de precesión de un objeto en bamboleo depende parcialmente del ángulo que forma su eje de simetría con la vertical. Cuando Whitehead y Curzon estudiaron esa relación, se encontraron con una sorpresa. En general, todo objeto que se bambolee precesa estacionariamente para cualquier inclinación comprendida entre un ángulo nulo (con el eje de simetría casi vertical) y 90 grados (con el eje casi horizontal). Pero la sorpresa estriba en que el objeto no precesa estacionariamente dentro de un intervalo de ángulos que viene determinado por su forma. Este intervalo prohibido se determina fácilmente si el objeto rueda sobre un borde circular, como es el caso de monedas y botellas, pero es más complicado de establecer cuando la forma es irregular.

Para definir en qué condiciones se da una precesión estacionaria, Whitehead y Curzon trabajaron con un cilindro. El intervalo de ángulos de inclinación para los cuales un cuerpo cilíndrico no puede precesar depende de la forma de éste. En especial, es crítico el cociente entre la semialtura del cilindro y su radio. Este cociente, llamado cociente característico, es pequeño en las monedas; alto, en las latas de cerveza y en la mayoría de los demás cilindros.

En la mitad inferior de la página 118 se ofrecen los resultados del estudio. En el eje horizontal se representan los cocientes característicos y en el vertical las inclinaciones. Así, la inclinación de una moneda es pequeña cuando está casi tumbada y, grande, cuando está casi de canto.

Para que el cilindro precese estacionariamente, su eje de simetría debe hallarse fuera del intervalo prohibido, el cual está delimitado por los ángulos θ_1 y θ_2. El ángulo es θ_1 cuando el centro de masa del cilindro se halla exactamente en la misma vertical que el punto de apoyo, en cuyo caso la gravedad no produce momento de giro alguno para la precesión. Para un ángulo de θ_2, el vector representativo del momento cinético es vertical y el momento de giro tampoco produce precesión.

De ordinario ambos ángulos difieren. Sólo coinciden en los cilindros cuyo cociente característico valga $\sqrt{3}/2$ (un medio de la raíz cuadrada de tres). Todo cilindro cuyo cociente caracterís-

tico sea inferior a ese valor precesará a la manera de una moneda y se comportaría como refleja la porción izquierda de la gráfica. La precesión de los cilindros alargados, como las latas de cerveza, responde a la porción derecha de la gráfica.

Una moneda que se ponga a bailar sobre una superficie comenzará a bambolearse precesando estacionariamente del modo que indica la zona *a* de la gráfica. Pero, conforme pierde paulatinamente su energía a causa del rozamiento, su inclinación va decreciendo. La velocidad inicial de precesión decrece también; mas cuando la inclinación se acerca a cero, la velocidad de precesión torna a elevarse. Esta variación es detectable con el oído y la vista a la vez. A medida que la inclinación disminuye, la frecuencia del sonsonete de la moneda decrece primero (delatando la disminución inicial de la velocidad de precesión) y, después, aumenta.

Las variaciones de la velocidad de rotación pueden asimismo seguirse contemplando la moneda desde arriba. Al principio el giro será demasiado rápido para que pueda distinguirse claramente la cara de la moneda. Pero cuando ésta se aproxime a su posición horizontal final, la cara se distinguirá mejor. Además, el sonsonete creciente, debido al aumento de la velocidad de precesión, contrastará vivamente con la disminución de la velocidad de rotación.

¿Cómo es posible que aumente la velocidad de precesión de una moneda que se bambolea, si ésta pierde energía por rozamiento? Veamos esto. La moneda posee energía de tres clases. Dos de ellas son energías cinéticas de rotación asociadas, respectivamente, al giro en torno al eje de simetría y a la precesión alrededor de la vertical. La tercera es energía potencial gravitatoria. Esta la poseen todos los puntos de la moneda, salvo el que está en contacto con la mesa; pero la situación se comprende mejor suponiendo que toda ella esté asociada al centro de masa.

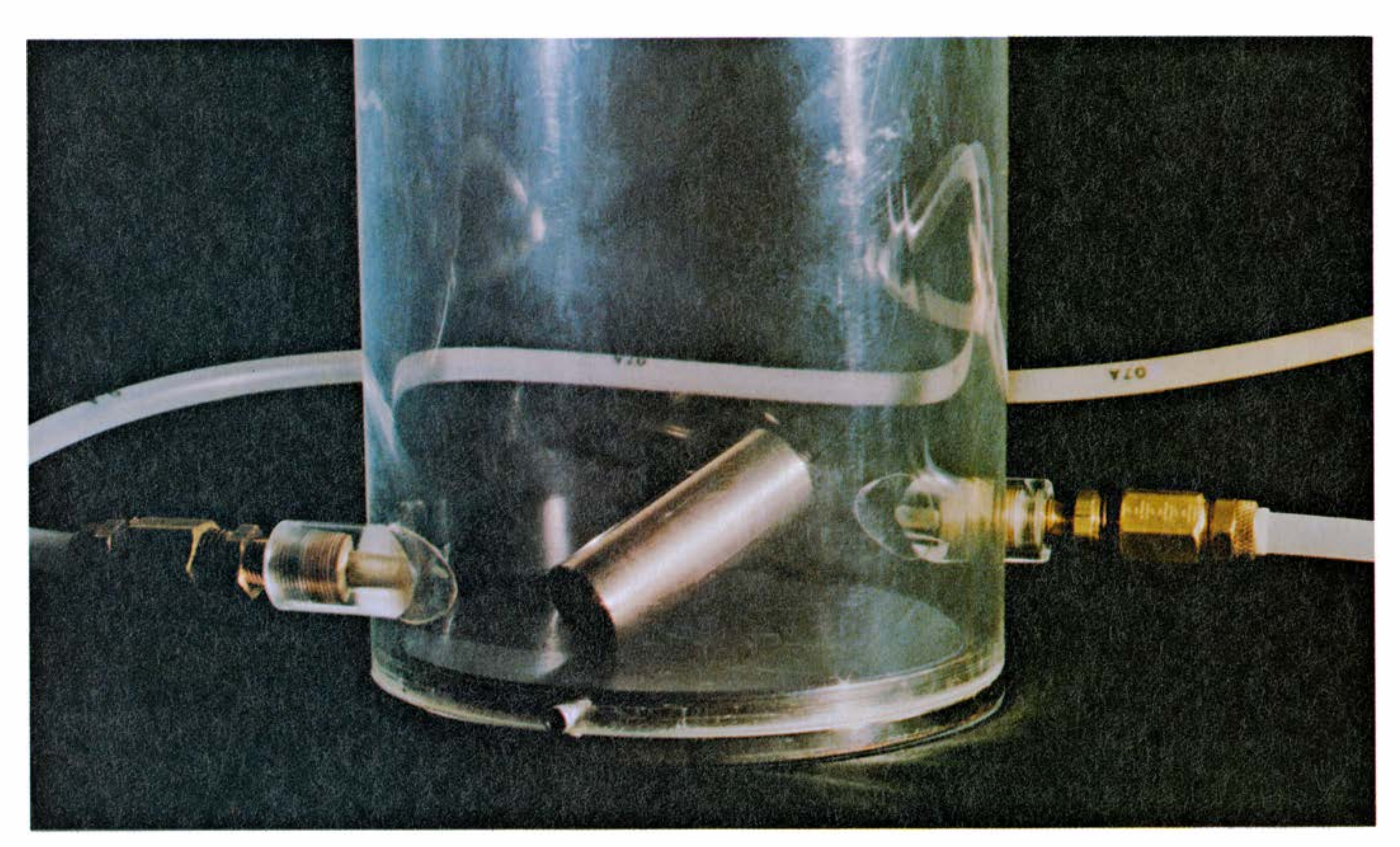
La moneda ha de ladearse cada vez más, a medida que se bambolea, porque el frotamiento con la superficie disipa gradualmente la energía del giro alrededor del eje de simetría. Al disminuir la velocidad de giro, el eje de simetría debe acercarse a la vertical y, en consecuencia, el centro de masa desciende aproximándose a la superficie y la moneda pierde energía potencial. Esta pérdida de energía (tanto cinética como potencial) obliga a la moneda a precesar más rápidamente, de un modo parecido a como una pelota rebota con mayor frecuencia conforme disipa energía.

No hay objeción teórica a que la moneda se ponga a bailar en las condiciones representadas en la zona *b* de la gráfica; pero resulta difícil que lo haga. Aquí, la moneda comenzaría a girar desde casi la vertical y, a medida que perdiese energía por rozamiento, su inclinación aumentaría hasta 90 grados. Así, en principio, debería llegar al reposo en equilibrio sobre el canto; pero, en la práctica, ello es poco probable ya que las monedas son demasiado sensibles a las pequeñas perturbaciones. Lo probable es que se tumbe sobre la superficie.

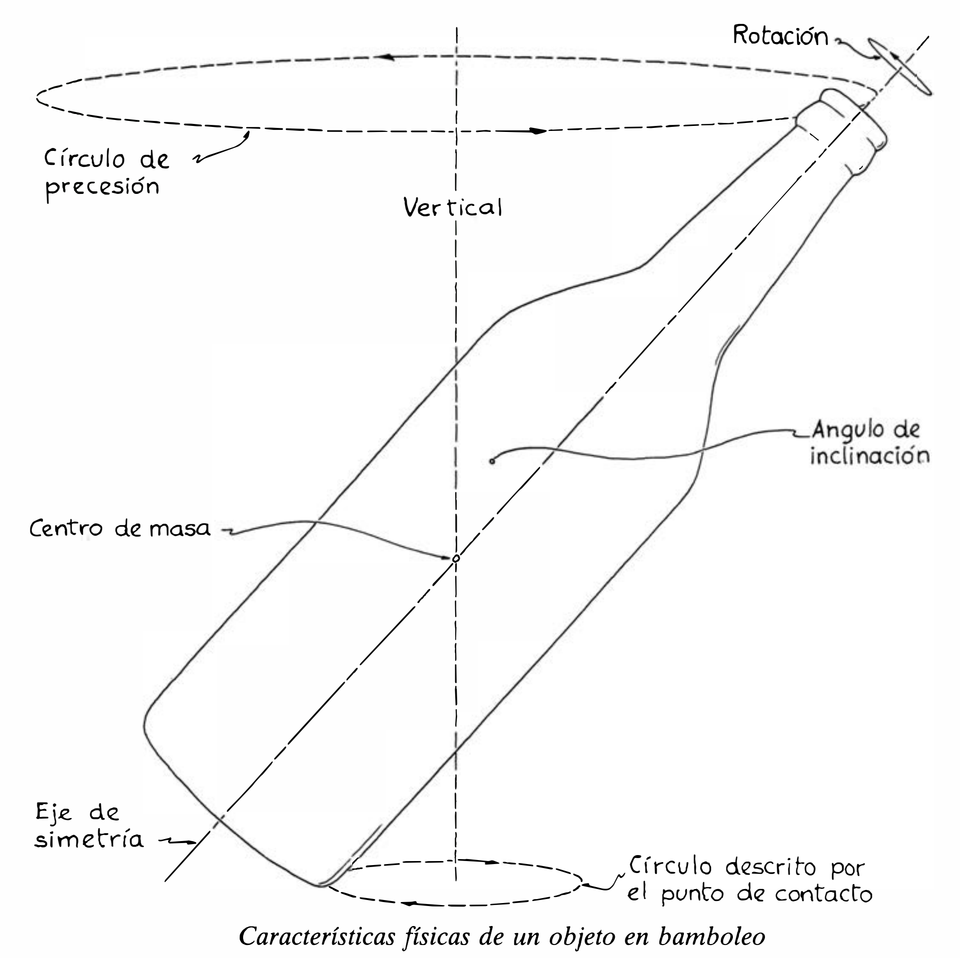
Los cilindros con cociente característico de $\sqrt{3}/2$ son los que presentan un más amplio intervalo de ángulos de inclinación con precesión uniforme. Los cilindros de mayor longitud, como las botellas, se bambolean de dos maneras diferentes, a las que corresponden las zonas *c* y *d* de la gráfica. Un cilindro que se ponga a bambolear estando casi derecho se comportará como muestra la zona *c*. Para que una botella danzara de esa guisa bastaría con colocar una mano a cada costado de la misma, manteniéndola inclinada un ángulo casi igual al de equilibrio θ_1, y con moverlas rápidamente en sentidos contrarios.

Entonces, la botella rodará sobre la orilla de la base, ganando velocidad gradualmente y disminuyendo su inclinación conforme se acerca a la vertical. Como se trata de un objeto alargado, quizá la afecten las irregularidades de la orilla y de la mesa. Este bamboleo suele ser inestable.

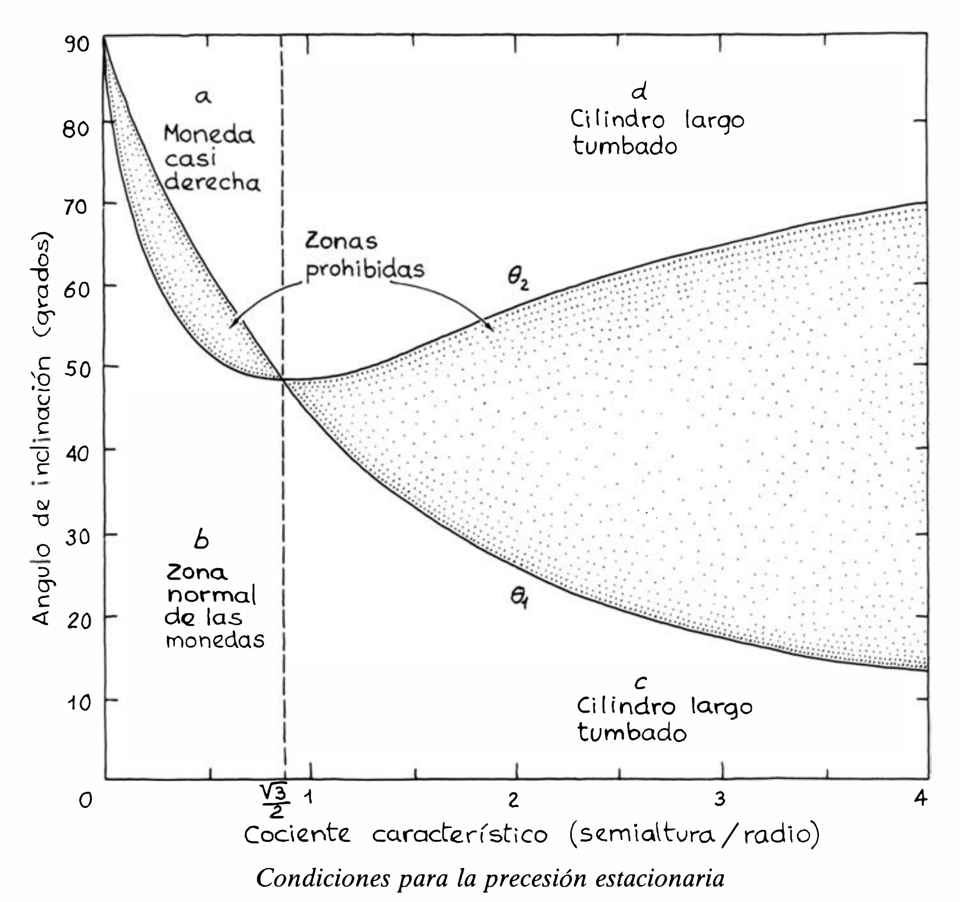
Un cilindro que se bambolea en las condiciones de la zona *d* comenzará



Bamboleo de un cilindro de aluminio en el interior del recinto ideado por Lorne A. Whitehead



Características físicas de un objeto en bamboleo



Condiciones para la precesión estacionaria

con su eje de simetría casi vertical, pudiendo ser la inclinación un poquito mayor que el ángulo θ_2. Al igual que en el caso de una moneda, la inclinación no puede ser exactamente θ_2, pues entonces las velocidades de giro y precesión serían infinitas. Al perder energía, el cilindro comienza a torcerse y su velocidad de precesión disminuye uniformemente. En principio, cuando llegue a tumbarse conservará todavía una precesión mínima, pero el rozamiento con la superficie lo detendrá en seguida.

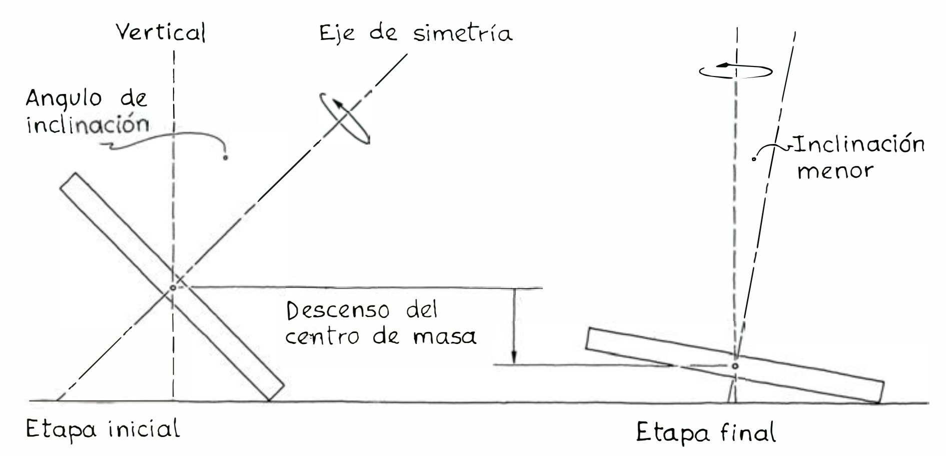
Un golpe de dedos rápido pone en ese movimiento a cualquier figura cilíndrica. El objeto precesará con suavidad y descenderá paulatinamente hacia la superficie, por donde rodará de una manera más irregular. El sonsonete disminuirá uniformemente de frecuencia.

Al comienzo de sus investigaciones Whitehead comprendió que el bamboleo de un cilindro podría prolongarse con chorros de aire. Preparó un dispositivo para proyectar chorros de aire tangencialmente sobre un cilindro de aluminio de ocho centímetros de largo por tres de diámetro. Lanzado manualmente con un gran ángulo de inclinación, el cilindro empezó a bambolearse de la forma que representa la zona *d* de la gráfica. Regulando los chorros convenientemente pudo lograr frecuencias de precesión de hasta 100 ciclos por segundo. Pero, si bien el movimiento era estable, el cilindro propendía a desplazarse erráticamente de un lado a otro de la mesa. Whitehead se propuso construir otro dispositivo.

El resultado fue un receptáculo dotado de una base de plexiglás de 15 centímetros de diámetro. Mecanizó la base para darle forma cóncava, con un radio de curvatura de 50 centímetros, e hizo pulimentar la superficie superior para eliminar toda aspereza que pudiera estorbar a un bamboleo estable. A dicha superficie se encoló una capa de caucho de unos 25 milímetros de grueso para mejorar la resistencia al aire. La superficie cóncava impide así que el cilindro se aparte del centro al bambolearse.

Para el ensayo se lanzan chorros de aire, procedentes de un compresor neumático de laboratorio de tipo corriente, directamente al interior del recinto y junto a la base del mismo. Los chorros mantienen la energía del cilindro, compensando las pérdidas por rozamiento. El aire sale del recinto por la tapa, que es un trozo de plexiglás plano con orificios.

La principal dificultad que Whitehead hubo de solventar fue cómo observar en instantes discriminados la precesión y el giro del cilindro. Habitualmente, ambas velocidades son dis-



Etapas del bamboleo de una moneda

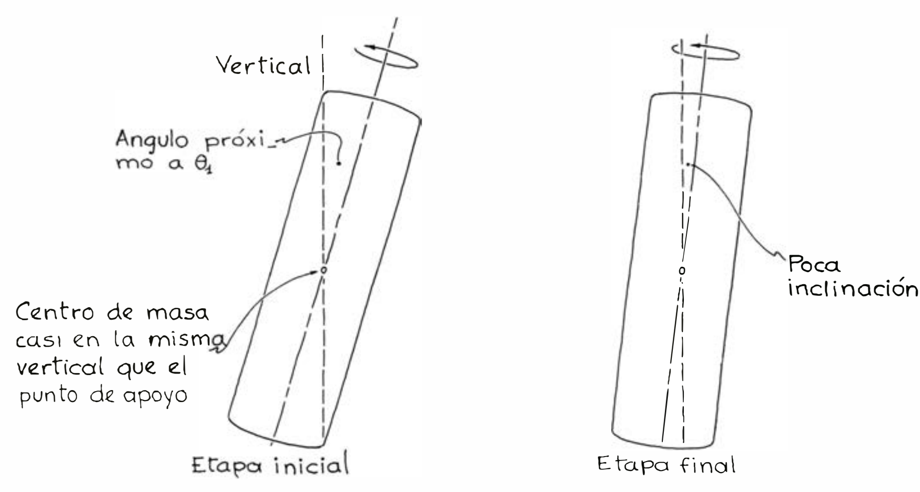
tintas. La solución consiste en preparar un cilindro cuya velocidad de giro sea un múltiplo entero de la velocidad de precesión. Entonces, si la luz de un estroboscopio se sincroniza con la precesión, tanto ésta como la rotación podrán observarse discriminadamente.

Whitehead utilizó un cilindro, mecanizado con gran esmero, de cociente característico 2,71. Las condiciones de la figura eran tales que, cuando se bamboleaba con una inclinación de 64 grados, su velocidad de rotación debía doblar la de precesión. El ángulo mencionado era próximo al θ_2 del cilindro. Regulando el caudal de aire lanzado por los chorros consiguió el ajuste fino del ángulo de inclinación y el de la velocidad de precesión. El estroboscopio funcionó a una frecuencia de 50 hertz.

Para lograr la relación deseada de 2 entre las velocidades de giro y de precesión, Whitehead tuvo que repasar el mecanizado del cilindro. Lo que requirió una precisión de 0,1 milímetros. Una vez totalmente preparado el cilindro, lo puso en movimiento manualmente para que se bambolease en las condiciones de la zona *d*. Rápidamente alcanzó un bamboleo estable con una inclinación próxima a la deseada. Sostuvo este ángulo regulando el caudal de aire; consiguió mantener el bamboleo hasta tres o cuatro días. Un cilindro así podría mantenerse en bamboleo un intervalo mayor, si la base cóncava del dispositivo se construyese de un material más duro que el plexiglás. En nuestro caso, para seguir empleando el mismo plexiglás en otros ensayos, sería necesario volver a pulimentarlo.

En su análisis del bamboleo de una moneda, Olson remedó los métodos que se siguen en la descripción del movimiento de una peonza de juguete. La verdad es que ambos objetos se parecen mucho. Cuando la moneda de Olsson gira sobre su canto, la rotación comienza siendo estable frente a las perturbaciones que ofrece la mesa y frente a la gravedad. Pero el rozamiento refrena gradualmente la rotación, y ésta desciende pronto por debajo de un valor crítico que determinan la masa de la moneda, su radio y su momento de inercia. En ese instante, la moneda empieza a bambolearse.

Olsson hace asimismo demostraciones de bamboleo a gran escala, poniendo a bailar un disco de aluminio de unos 25 milímetros de grueso y del tamaño de una tapa de alcantarillado. Acompaña al bamboleo un ruido de buena intensidad y, hacia el final, cuando el disco ya está casi horizontal, el estrépito resulta impresionante. En un aula donde los asientos del auditorio estén escalonados, los alumnos pueden observar la velocidad de rotación y, a la vez, escuchar el sonido producido por la frecuencia de precesión. El contraste entre la disminución del uno y el aumento del otro es fascinante.



Etapas del bamboleo de un cilindro largo

En febrero pasado examinamos el fenómeno de la formación de burbujas en la cerveza y demás bebidas carbónicas. Me han escrito numerosos lectores con el ánimo de ampliar la explicación que les ofrecí acerca del hecho de que las burbujas formadas en el fondo de un vaso de cerveza crezcan al ascender. Atribuí entonces ese aumento de volumen a la reducción de la presión hidrostática. Pero quienes discrepan señalan que las burbujas se dilatan más de lo que correspondería a la mera disminución de la presión hidrostática y que deben recoger anhídrido carbónico a medida que se elevan.

Me equivoqué, asimismo, al afirmar que las burbujas de gas se generan exclusivamente en los costados del vaso, donde ya existen bolsas de aire o de anhídrido carbónico adheridas a las grietas. Estas bolsas sirven, por supuesto, de núcleos de formación de burbujas. Pero hay otro foco de formación, como apunta Thomas D. Kunkle, del Laboratorio Nacional de Los Alamos. El líquido contiene bolsitas de gas microscópicas residuales de la cavitación que se produce al verter la cerveza en el vaso. Yo habría admitido que las moléculas gaseosas de tales bolsitas se difunden rápidamente en el líquido, en el que se disuelven. Según Kunkle, tales bolsitas se estabilizan, por contra, frente a la difusión merced a la tensión superficial de las moléculas que constituyen la "corteza" de dichas bolsitas y que es del grueso de una molécula. Esas bolsitas gaseosas actúan entonces de agentes nucleadores para la formación de burbujas a medida que sale más gas de la solución.

Rinehart S. Potts, de Glassboro, New Jersey, me pregunta por qué no deben lavarse con detergentes los vasos de cerveza. Ello importa únicamente si se desea que haya muchas burbujas en la cerveza después de que remita la cavitación producida por el vertido de la bebida. Los detergentes dejan una capa que recubre la superficie y las grietas tienen así menos posibilidades para actuar de puntos de nucleación.

Paul C. Condit, de San Anselmo, California, y Richard W. Hill, de East Lansing, Michigan, aluden a la práctica de añadir sal a la cerveza, una vez servida en el vaso. Hay quienes lo hacen porque les agrada el sabor; otros, porque la sal produce más burbujas. Las bolsas de aire adsorbidas en cada grano de sal actúan de nucleadores.

Una "yarda" de cerveza es un recipiente de forma característica, cuya longitud es de una yarda aproximadamente (algo más de noventa centímetros), provisto de un fondo redondo y un cuello largo y estrecho. El bebedor debe conocer cómo beber de ella o una efusión de líquido repentina le procurará un remojón. Les dije que el truco reside en golpear levemente el cuello para que las burbujas suban por el recipiente inclinado y sustituyan al líquido que fluye poco a poco hacia el bebedor. Martin Reid, de Surrey, Inglaterra, describe una técnica mejor, que da buen resultado aunque el líquido no sea carbónico (tal es el caso de ciertas cervezas negras inglesas del tipo *ale*). Consiste en dar vueltas al cuello del recipiente a la vez que se bebe; de ese modo, el líquido se traslada por los costados del cuello, y no sólo por el fondo; se controla así mejor el caudal de fluido.

H. D. Westphal, de Puchheim, Alemania Occidental, me envía un procedimiento para eliminar la capa en exceso de espuma que pueda formarse en una cerveza servida en un vaso. La *weissbier* (o *weizenbier*), que se elabora con trigo, lleva levadura, al objeto de que la etapa final de la fermentación tenga lugar en la botella. Estas cervezas contienen anhídrido carbónico en cantidad mucho mayor que la generalidad de las demás cervezas, por lo que se genera una gran capa de espuma cuando se sirven. Tradicionalmente se toman en vasos altos, de costados curvos y de fondo interior plano, que se enjuagan en agua fría, de la que se deja una pequeña porción en el fondo. Se introduce luego la botella en el vaso, acercando el cuello al fondo. Conforme sale la cerveza y se genera espuma, la botella se iza entonces a la misma velocidad y sorbe la espuma. Luego se deja aparte la botella para beber de ella la cerveza que cedan las burbujas cuando hayan reventado todas.

Dos cartas me han recordado cosas que llevo años oyendo, pero que jamás pude confirmar. James L. Ealy, Jr., de Pottstown, Pennsylvania, afirma que, cuando se agita inadvertidamente una botella o lata de cerveza, el anhídrido carbónico que se haya liberado puede redisolverse golpeando levemente el envase con un cuchillo u otro objeto. Tras el golpe, podrá abrirse el recipiente sin que se produzca una erupción de espuma y líquido. Me es imposible explicarles qué tendrán que ver las vibraciones del envase con que el gas regrese a la solución.

Alvaro de Paiva Abreu, de Río de Janeiro, me ha recordado que un procedimiento para impedir que una bebida carbónica contenida en un envase pierda su efervescencia durante un rato consiste en introducir en el cuello el mango de una cuchara metálica. Si realmente dicha treta retarda la pérdida de gas, ¿cómo lo logra? Recibiré gustosamente las explicaciones que aclaren los efectos de estos dos últimos trucos.

Dispositivo ideado por Whitehead para estudiar el bamboleo

Libros

Epistemología e historia de la física y un clásico europeo de la histología

M. García Doncel, M. A. Quintanilla y M. Durfort

Ensayos sobre el Pensamiento Científico en la Epoca de Einstein, por Gerald Holton. Alianza Universidad; Madrid, 1982. Gerald Holton simultanea en la Universidad de Harvard la cátedra Mallinckrodt de física con una cátedra reciente de historia de la ciencia. Resulta así el animador de uno de los departamentos más serios de historia de la ciencia de cuantos han ido proliferando en las universidades norteamericanas durante estos últimos decenios. Entre sus investigaciones históricas destacan las relacionadas con la introducción de la física relativista, para las que ha estudiado en profundidad los manuscritos archivados en el Estate Albert Einstein de Princeton. La seriedad de ese trabajo historiográfico le ha obligado a abordar también problemas epistemológicos. Y su vocación a la docencia de la física le ha impulsado, además, a aplicar la historia a la didáctica de las ciencias. Esta última faceta didáctica es la más conocida en castellano, a través de su obra *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas* (Reverté, 1976). El libro que presentamos da a conocer sus otras facetas de historiador y de epistemólogo.

Constituye una antología de siete artículos, la mayor parte de ellos publicados en una u otra de sus antologías inglesas: *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein* (Harvard Univ. Press, 1973) y *The Scientific Imagination: Case Studies* (Cambridge Univ. Press, 1978). Siguiendo esa línea genética, podemos distinguir en el libro actual dos partes. La primera comprende la introducción y tres capítulos. En ella Holton presenta sus intereses epistemológicos, especialmente el del papel de las "preconcepciones temáticas" de los científicos en la gestación de las ciencias. Son artículos recientes, los dos primeros publicados en *Scientific Imagination* y el tercero posterior. La segunda parte abarca los capítulos 4 al 6, publicados en *Thematic Origins* con los números 8 al 10. Son trabajos historiográficos sobre Einstein, alguno de los cuales se ha convertido ya en clásico de la historia de la ciencia. El capítulo séptimo, redactado con ocasión del centenario de Einstein, concluye el libro afirmando su unidad. Parte de la epistemología científica expuesta por Einstein, pero la enriquece y la hace propia, al engarzar en ella las "preconcepciones temáticas".

El sentido de estas "preconcepciones temáticas" está bien explicado en la introducción y en el capítulo primero. Las ciencias empírico-formales conjugan dos dimensiones, la experimental o empírica y la teórica o formal. Pero al estudiar su gestación histórica real se descubre en ellas una tercera dimensión, temática, constituida por presupuestos conceptuales o "preconcepciones" a las que se adhiere fielmente el científico, por más que no siempre las explicite en sus artículos.

Pero el trabajo del historiador no ha de quedar bloqueado en esa dimensión temática. Holton mismo le atribuye dos tareas anteriores. La primera es el estudio de la gestación del trabajo científico, tal como aparece en las fuentes publicadas e incluso tal como se descubre en la estructura fina de las fuentes concomitantes no publicadas. La segunda tarea es el estudio de las producciones científicas como acontecimientos situados en la encrucijada, no sólo de esas trayectorias pública y privada, sino también de la trayectoria sociológica, impuesta por la comunidad científica y por el contexto global de su época (págs. 9-10). Esas dos tareas pueden subdividirse en ocho (págs. 19-22). Un par de ellas consideran el acontecimiento científico ya elaborado: estudio de su contenido a través de los conceptos actuales o los coetáneos y análisis lógico de su estructura. Otros tres pares de tareas se refieren a su gestación: estudio de la línea pública de su desarrollo y especialmente de su momento inicial de alumbramiento, seguimiento de la línea privada de actividad científica y de la "franja psico-biográfica" concomitante, y, finalmente, estudio de la línea sociológica de su desarrollo y de las franjas concomitantes de su repercusión tecnológica, ética y literaria. Sólo tras cumplir esas tareas y subtareas deberá investigar el historiador las preconcepciones temáticas. Podrá también sacar de su estudio consecuencias útiles, tanto para la historia y filosofía de la ciencia, como para nuestra cultura y nuestros programas educativos. La historiografía científica es para Holton una tarea muy compleja.

También es para él compleja la dimensión temática. En ella distingue los temas conceptuales, o componentes temáticos de los conceptos científicos, los temas metodológicos, por ejemplo enunciar las leyes en forma de leyes de conservación, de mínimo o de imposibilidad, y los temas proposicionales, o hipótesis básicas del sistema axiomático. Comenta Holton de pasada (págs. 41-42) que esos elementos temáticos pueden estar relacionados con aspectos cosmovisionales de los paradigmas de T. S. Kuhn. Pero no cabe identificar los temas con los paradigmas. Pues pueden darse enfrentamientos temáticos en un período de ciencia ordinaria dominado por un paradigma, pueden sobrevivir los temas a la revolución que cambió el paradigma y, finalmente, los temas no han de ser compartidos necesariamente por la comunidad científica, dado su carácter más personal y privado.

Holton enumera una gran diversidad de temas: simplicidad, constancia, simetría, eficacia de representaciones geométricas, de modelos mecánicos, etcétera. Y cita también grupos de temas relacionados, en especial parejas de temas antitéticos: atomicidad-continuo, orden-desorden, reduccionismo-holismo. Porque estos temas no son una preconcepción sistemática suya. Más bien se los encuentra entremezclados, al perseguir la gestación científica en su línea privada. Podríamos decir que los temas no pertenecen a la dimensión temática, sino a la empírica, de su investigación historiográfica.

La primera parte del libro ilustra su concepción de los temas a través de una serie de ejemplos. Así, el capítulo primero alude a la pareja temática "orden-desorden" en la física de Newton a Einstein, pasando por la teoría cinética de los gases. Analiza temáticamente algunos artículos recientes de Steven Weinberg (el que escribió por ejemplo en *Scientific American*, julio de 1974, pág. 56), que es uno de los creadores de la teoría unificadora de las interacciones electromagnéticas y las nucleares débiles, sancionados por el premio Nobel de física de 1979. En ese análisis descubre la importancia de temas como átomo-estructura-continuo, pocas partículas fundamentales o simetría básica.

El segundo capítulo estudia los experimentos de la gotita de aceite de Ro-

bert A. Millikan, con los que, según la opinión vulgar, demostró el valor discreto de la carga eléctrica al medir la carga del electrón. Holton cuenta la historia de los tres ensayos sucesivos de Millikan de 1908 a 1913; y entra en la estructura fina de ese proceso, al comparar los resultados publicados con los cuadernos de laboratorio donde consta qué datos son dignos de publicarse y cuáles no. A estos experimentos autoseleccionados del novel físico norteamericano que era entonces Millikan, se enfrentaron las experiencias de Felix Ehrenhaft, que simbolizan la tradición de rigor experimental de los laboratorios de Viena y que parecían rechazar el carácter discreto de la carga eléctrica. Millikan era un atomista convencido, mientras que Ehrenhaft personificaba la postrer defensa del antiatomismo de Ernst Mach.

El tercer capítulo estudia el principio de complementariedad, expuesto por Niels Bohr a partir de la conferencia Volta de 1927. Tal principio ofrece un claro filón temático y, sobre todo, la sublimación de las parejas tema-antitema: onda-corpúsculo, definición-observación, sistema-aparatos. Continuando las investigaciones de Max Jammer, busca las raíces filosóficas de ese principio en los influjos recibidos por Niels Bohr de su profesor Herald Hoffding, interesado por los "científicos filosofantes", y de sus posibles lecturas de la teoría de "las partes transitivas y sustantivas" de Williams James y hasta de la dialéctica cualitativa de Kierkegaard. Es una tortuosa línea privada de pensamiento, que lleva a Bohr a desarrollar el tema de la complementariedad, no sólo en el campo de la física, sino también en el de la psicología y el folklore.

La segunda parte del libro recoge tres trabajos históricos sobre Einstein. Constituye mérito historiográfico de Holton haber reivindicado, desde 1960, el papel decisivo de éste en la elaboración de la teoría de la relatividad especial, frente a quienes seguían atribuyéndola a Lorentz o Poincaré. Y es también mérito suyo haber subrayado el carácter epistemológico de esta elaboración einsteniana. En el capítulo cuarto plantea el enfoque epistemológico y estudia la peregrinación filosófica de Einstein, desde su época de simpatía por el positivismo machiano hasta su ulterior superación en una epistemología realista y creacionista al mismo tiempo.

El capítulo quinto, publicado en 1969 en la revista Isis, es un clásico de la historiografía científica. Refuta allí el esquema didáctico, usual en nuestros libros de texto, según el cual la relatividad especial tiene su origen en el experimento crucial de Michelson-Morley. Estudiando la estructura fina de los documentos no impresos, demuestra que ha de minimizarse el impacto de este ensayo en el pensamiento de Einstein y en la formulación de su relatividad.

En el capítulo siguiente intenta captar el genio científico de Einstein. Desarrolla un análisis de las antítesis temáticas que inspiraban su pensamiento, así como un estudio psico-biográfico del paralelismo entre su actividad científica y su temperamento humano.

Por último, Holton conjuga la historiografía sobre Einstein con la presentación de su propia epistemología. Parte, en efecto, del esquema epistemológico que Einstein expone, gráficamente ilustrado, en una carta de 1952 a su viejo amigo Solovine. Del plano de la inspiración empírica (E) se eleva en un atrevido salto (J) al nivel de la axiomatización (A), a partir de la cual deduce sentencias (S), comprobables de nuevo en el plano empírico (E). Holton analiza en detalle este mecanismo EJASE, y se lo apropia al proponerlo como mecanismo de retroalimentación capaz de explicar el progreso científico. Lo hace suyo, en particular, cuando introduce los prespuestos temáticos como filtros que intervienen en ese momento, difícilmente controlable, del salto (J) desde la inspiración empírica hasta la axiomatización. La función de filtro no explica positivamente el resultado axiomático. Pero al menos explica negativamente la eliminación de otros posibles caminos de axiomatización, por ser incompatibles con los presupuestos temáticos propios del científico.

Es un libro muy recomendable para cuantos estén interesados por la física moderna o por su historia y epistemología. Introduce rápidamente en el estilo de trabajo de una buena escuela de historia de la ciencia. Y permite comprobar cómo ese trabajo serio lleva, sin pretenderlo, a descubrir en los científicos y a elaborarse para sí mismo una cierta epistemología. Una epistemología que Holton no presenta con pretensiones de una concepción sistemática exhaustiva, pero que aporta puntos de vista nuevos y está avalada por la experiencia histórica. La versión castellana de José Otero es en su conjunto muy lograda. (M. G. D.)

TEORÍA Y EXPERIENCIA, por Wolfgang Stegmüller. Traducción de C. Ulises Moulines. Editorial Ariel; Barcelona, 1979. El filósofo de la ciencia se interesa por entender, de forma conceptual y reflexiva, en qué consiste la ciencia. En esta medida su tarea no está exenta de interés para el científico, el cual, aunque conoce su trabajo, a veces encuentra problemas para entender reflexivamente lo que está haciendo (en especial cuando se enfrenta con temas nuevos o con la exigencia de enseñar, explicar o justificar sus propias ideas o descubrimientos). Pero esa tarea la puede llevar a cabo el filósofo siguiendo muy diversas estrategias, según sea lo que entienda que otros esperan de él. Puede, por ejemplo, dedicarse a hacer un estudio histórico del desarrollo de una ciencia, o puede considerar a ésta como un fenómeno social o cultural y aplicarle el mismo tipo de métodos de estudio que se aplican en filosofía social o de la cultura. En todo caso lo normal es que el filósofo entienda la ciencia como una forma avanzada de conocimiento racional y empírico, y que el problema fundamental que le preocupe sea el de entender en qué consiste y cómo se justifica ese conocimiento científico del mundo que nos rodea. Esta es al menos la perspectiva que han adoptado los clásicos contemporáneos de la filosofía de la ciencia que generalmente han sido, como Mach, Poincaré, el mismo Russell, tanto científicos en activo como filósofos provistos de una sólida formación. Y éste es también el enfoque predominante en la filosofía de la ciencia hegemónica durante los últimos treinta años en el mundo occidental, a la que es habitual –aunque quizá no muy correcto– referirse con el rótulo de "filosofía analítica de la ciencia".

Una de las características de la filosofía analítica de la ciencia es el uso de métodos de análisis formal (lógicos y matemáticos) para estudiar los problemas con que se enfrenta. Estos métodos han hecho posible que el filósofo plantee sus problemas con precisión y rigor y que la crítica de sus teorías se pueda hacer en los mismos términos. El resultado más positivo que así se ha obtenido consiste en que, a diferencia de lo que ha ocurrido en otras épocas u ocurre en otras áreas de la filosofía, en la actual de filosofía de la ciencia pueda detectarse una línea de progreso semejante, aunque indudablemente más lenta, a la que se ha producido en áreas limítrofes como la de la lógica formal y los fundamentos de las matemáticas. Pero la otra cara de la moneda de esta especialización del filósofo de la ciencia en métodos formales reside en la mayor dificultad actualmente existente para la comunicación entre él y otros especialistas, tanto del campo científico como del filosófico. La situación ha llegado hasta tal punto que no han faltado voces que han advertido del peligro de que la filosofía analítica de la ciencia se

convierta en una nueva forma de escolástica estéril. Lo que sí es cierto, en todo caso, es que cada vez se hace más necesario el ofrecer al público no especialista versiones sistemáticas, rigurosas y claras de los resultados.

Precisamente uno de los mayores méritos del libro de Stegmüller que motiva este comentario radica en que logra ofrecer una síntesis exhaustiva y rigurosa de las aportaciones más importantes que se han hecho en las últimas décadas a uno de los temas que más atención han recibido por parte de la filosofía analítica de la ciencia. La obra forma parte de una especie de *summa* que comenzó a publicar su autor en 1969 (*Probleme und Resultate der Wissenschafstheorie und Analytischen Philosophie*, Springer Verlag, Heidelberg 1969). El volumen que se ha traducido al español corresponde al segundo volumen de la obra original. Su tema específico es la formación de los conceptos y teorías. Pero por su contenido bien puede ser considerado, como sugiere el título, como un tratado general, hecho desde la perspectiva analítica, acerca del problema básico de las relaciones entre teoría y experiencia en el ámbito del pensamiento científico.

Está dividido en tres partes. La primera se encamina al análisis de los procedimientos y criterios presentes en la conceptualización y la teorización científicas. Por ingenuo que se sea, nadie se atrevería a afirmar hoy que los conceptos que la física utiliza para presentar la realidad son simples reflejos o retratos de ésta. Desde el primer momento la conceptualización impone a la experiencia las estructuras lógicas y matemáticas que aporta el pensamiento; y una cabal comprensión de la conceptualización científica debe partir de una adecuada caracterización de tales estructuras. Pues bien, lo que hace precisamente Stegmüller en el primer capítulo es presentar lo que hoy se considera la teoría estándar de la formación (en realidad de la estructura) de los conceptos científicos, debida fundamentalmente a Carnap y Hempel, y organizada en torno a la distinción entre conceptos clasificatorios, topológicos y métricos. Ofrece, además, una extensa discusión de la función de la metrización para la formulación de las leyes científicas y resalta el papel que desempeñan en la formación de los conceptos factores superpuestos como son las consideraciones de simplicidad, fecundidad, la contrastación de hechos empíricos, las estipulaciones convencionales y las suposiciones hipotéticas. El segundo capítulo constituye un extenso análisis del papel de estos mismos factores en la formación de teorías. Se centra para ello en la reconstrucción de la mecánica newtoniana, en cuya discusión sigue muy de cerca el tratado clásico de Nagel, en la geometría del espacio-tiempo (en discusión con Reichenbach) y en la teoría general de la relatividad. Stegmüller señala las diversas posibilidades de interpretación de una teoría física en términos de estipulaciones convencionales y de datos empíricos, así como el papel decisivo que, según él, desempeñan los criterios de simplicidad y de fecundidad de las teorías. El análisis que hace de la discusión entre Einstein y Poincaré a propósito de la relatividad general es revelador de su posición de compromiso entre el convencionalismo, el pragmatismo y el empirismo: tanto uno como otro –defiende Stegmüller– se basaban en criterios de simplificad, y la posición de Poincaré era perfectamente defendible; la diferencia, sin embargo, radicaría en que el criterio de Einstein (simplicidad física, frente a la simplicidad geométrica de Poincaré) resultó más fecundo.

El resto del libro está dedicado a otro tema central de la filosofía analítica de la ciencia: el problema del sentido empírico de las teorías. En realidad se trata de un problema que trasciende a cualquier planteamiento de escuela. Todo el que admita que una teoría pretende decir algo acerca de la realidad, que la experiencia humana sólo accede a la realidad observable y que en las teorías aparecen conceptos y enunciados sin correlatos observacionales, sabe que uno de los problemas más importantes de la filosofía de la ciencia es el de entender el significado de estos conceptos. Lo específico de la tradición analítica a este respecto radica, por una parte, en el enfoque empirista con que se enfrentó desde el principio a este problema y, por otra, en los progresos efectivos que el uso de métodos formales ha permitido realizar en este terreno. La pretensión original consistía en encontrar una forma de reducir todos los conceptos científicos o todos los enunciados que aparecen en una teoría a conceptos o enunciados observacionales. Pero esta idea ha sido superada como resultado de la crítica interna que el rigor formal ha hecho posible. Uno de los logros de Stegmüller consiste, precisamente, en haber sabido presentar con profundidad y claridad tanto el problema filosófico aquí implicado como el desarrollo y la crítica de las diversas soluciones propuestas especialmente por Carnap. Este es en general el contenido de las partes segunda y tercera. El capítulo cuarto está dedicado a justificar la necesidad de disponer en el lenguaje de la ciencia de términos teóricos, y a hacer plausible la idea de que tales términos son imprescindibles para mantener toda la capacidad predictiva de las teorías científicas. El capítulo V, que pertenece ya a la última parte del libro, está centrado en la exposición y crítica de los diversos intentos, y en especial el del Carnap de la última época, de determinar el sentido empírico de los términos teóricos. La posición a la que llega Stegmüller a través de la discusión con Carnap y con sus críticos constituye sin duda el punto de partida obligado para cualquier planteamiento posterior de este problema: hay que aceptar, concluye Stegmüller, tanto la imprescindibilidad de los términos o conceptos teóricos de la ciencia como la imposibilidad de interpretarlos completamente en sentido empirista.

Igualmente clarificadores son los dos últimos capítulos dedicados al teorema de Craig y a la solución de Ramsey para el problema de la eliminabilidad de los términos teóricos. En ambos casos hay que señalar tanto la claridad de la exposición y el tratamiento formal, como el interés de los comentarios de Stegmüller a propósito de la relevancia que estos procedimientos formales tienen para el problema filosófico que se está discutiendo. El teorema de interpolación de Craig, aunque permite una reformulación de cualquier teoría en términos puramente observacionales, no resuelve el problema filosófico porque conlleva una alteración radical de la estructura de la teoría, aparte de que la nueva formulación es inaplicable en la práctica y más bien extraña desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia (cada teorema de la nueva teoría requiere un postulado específico). El procedimiento de Ramsey, en cambio, aunque Stegmüller tampoco lo considera una solución definitiva, es presentado de una forma que permite ya comprender el gran papel que este tipo de análisis de las teorías desempeña en el enfoque estructural, desarrollado precisamente en los años setenta e incorporado por Stegmüller en el tercer tomo de su obra original (cuya publicación en castellano, por cierto, no debería demorarse por más tiempo).

El libro termina con un apéndice dedicado a la mecánica cuántica y un epílogo que intenta responder a la pregunta "¿En qué consiste el progreso científico?". En el apéndice el autor se basa en las ideas de Suppes para defender la tesis de que la mecánica cuántica es inconsistente si se entiende en términos de la teoría clásica de la probabilidad. El resultado lo obtiene a partir de un interesante análisis de la dispersión

de la posición y el momento, que aparecen en la relación de incertidumbre, en términos de la desviación típica estadística; y justifica el cambio en la estructura lógica de la teoría cuántica como la única forma aceptable de superar la contradicción. El epílogo, por último, es un avance informal de las ideas del autor acerca del progreso científico, ideas que ocupan la parte fundamental del tercer volumen antes aludido.

En resumen, se trata de un libro útil, y casi diría que imprescindible, para entender uno de los núcleos más activos de la filosofía analítica de la ciencia de las últimas décadas. Aunque no es un libro fácil, será de gran interés tanto para el filósofo de la ciencia como para el científico interesado por problemas de fundamentación. Está escrito, además, de tal forma que permite varias lecturas a diversos niveles o en diferentes etapas según las urgencias y los intereses del lector, siempre que éste tenga alguna familiaridad previa con el tema. Por último es de justicia decir que, en este caso, y a diferencia de lo que ya suele ser habitual, el lector español podrá disfrutar con la pulcra traducción de Ulises Moulines. (M. A. Q.)

HISTOLOGIA Y ANATOMIA MICROSCOPICA HUMANAS, por W. Bargmann. Cuarta edición. Editorial Espaxs, Barcelona, 1981. La mayoría de los histólogos españoles e hispanoamericanos se formaron con alguna de las tres primeras ediciones del clásico Bargmann. Quien firma esta reseña trabajó con la tercera de ellas, publicada por Labor en 1961, impecablemente traducida por Sánchez Lucas, catedrático por aquel entonces de histología y anatomía patológica en la Facultad de Medicina de Barcelona. Se esperaba con interés la cuarta edición, de Espaxs, cuya versión ha corrido a cargo de P. Mestre Ventura. Con interés y expectación: ¿se hallaría el "viejo" Bargmann a la altura de los que vinieron después, por nuevos o por reedición? ¿Aguantaría el parangón con Greep y Weiss (1975), Leeson (3.ª ed. 1977), Bloom Fawcett (7.ª ed. 1978)?

La primera parte, correspondiente a la citología, aparece notablemente ampliada y enriquecida con esquemas de los distintos orgánulos citoplasmáticos e imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de transmisión y barrido. Se han incorporado asimismo esquemas ultraestructurales de Krstić (la mayoría de los cuales se conocían ya a través del libro *Ultraestructura de las células de los mamíferos*, editado por la barcelonesa Eunibar en 1979).

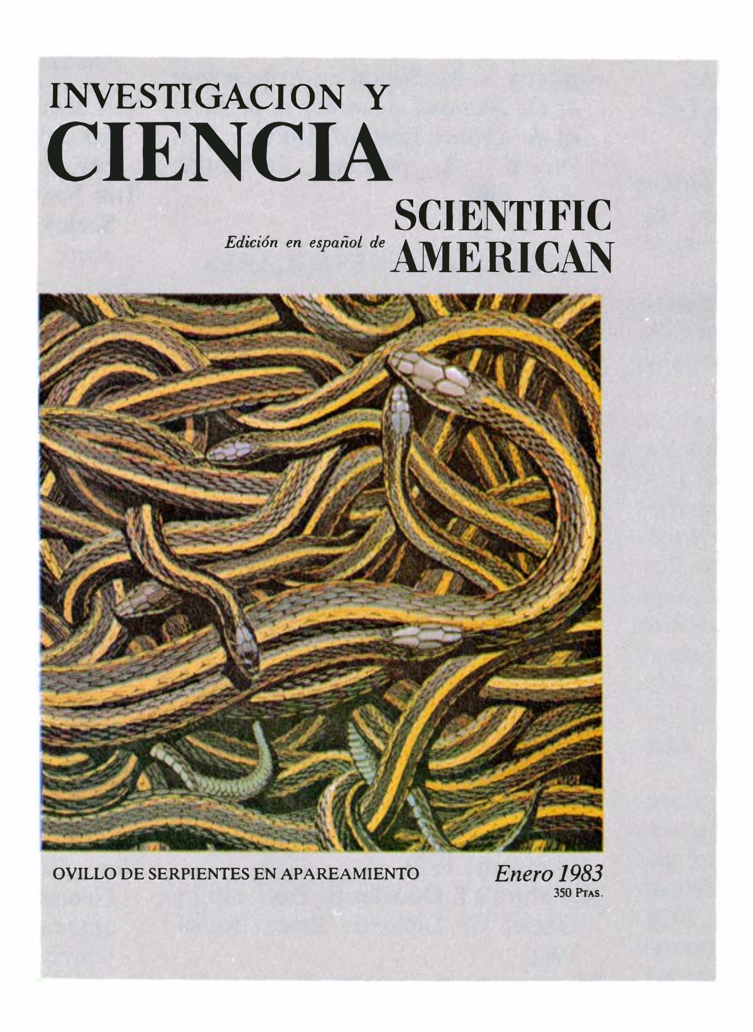
En lo referente a la histología, el Bargmann de 1981 tiene que competir con varios tratados magníficos, algunos de los cuales le superan en determinados capítulos; así, el tema de la sangre está mucho más desarrollado, por ejemplo, en el Bloom Fawcett. Pero sería injusto no ponderar el esfuerzo realizado en el caso de piel y faneras. Y el esquema ultraestructural de la espermatogénesis, por ejemplo.

Un punto de interés en todo manual destinado a los estudiantes y a cuantos por primera vez se aproximan a la materia es el de la uniformidad del lenguaje empleado. Citemos el caso de cómo denominar la célula germinal femenina y las cubiertas que suele presentar. Indistintamente vemos escrito oocito, ovocito, óvulo y huevo. Diríase que lo más correcto sería definir el oocito como la célula germinal femenina en el ovario o gónada femenina, antes de que se haya reducido su número de cromosomas a la mitad por la mitosis, lo que en la escala zoológica puede acontecer en diversos momentos. Siendo el óvulo la célula germinal femenina haploide, esté en el ovario o se encuentre en las trompas o vías genitales femeninas inferiores, en el caso de los invertebrados. El huevo, y mejor célula huevo, debe reservarse para designar la resultante de la fusión de los pronúcleos masculino y femenino, una célula diploide por tanto. Tamaña precisión se ve entorpecida cuando se traduce del inglés, que emplea en esos tres momentos la misma palabra: "egg".

Expuesto lo anterior, no nos ha sorprendido demasiado la traducción realizada por Mestres, donde abundan los términos de aplicación incorrecta. Se lee microvilios por microvilli, fibrillas por microtúbulos (y no se diga que este lapsus es menor), espermátide por espermátida y confunde oolema con zona pelúcida. Da la impresión de que ha faltado una última lectura que unificara el texto, y así se evitaría encontrar aquí espermatozoo y allí espermatozoide; o esta otra perla: "astrocito de gran tamaño del cerebro de un gatito, vivo en cultivo de tejido", por "observación vital de un astrocito de gran tamaño perteneciente a un cultivo de tejido cerebral de un gato recién nacido".

La exposición de Bargamnn es equilibrada y rigurosa. Al final de cada capítulo introduce una extensa relación bibliográfica sobre el tema desarrollado, aunque nos gustaría haber leído la reseña de algunos trabajos de Ramón y Cajal al término del apartado dedicado al sistema nervioso o cuando aborda los órganos de la visión. (M. D.)

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



INTERRUPTOR GENETICO EN UN VIRUS BACTERIANO, por Mark Ptashne, Alexander D. Johnson y Carl O. Pabo
Dos proteínas reguladoras interactúan con una región de ADN vírico para activar un conjunto de genes e inactivar otro en respuesta a un cambio ambiental.

GLUBOLAS, por Kenzo Ishikawa
Estas gluosferas constituyen "átomos de color", estados ligados de la partícula que transmite la fuerza de color, la mayor fuerza conocida. Algunos de ellos pueden haber sido detectados en experimentos de alta energía.

LA FISICA DEL TIMBAL, por Thomas D. Rossing
Las vibraciones de una cuerda de violín forman una serie armónica con una nota definida. Las vibraciones de una membrana ideal, sin embargo, no forman tales series. ¿Por qué, pues, tienen tono los timbales?

FISIOLOGIA ECOLOGICA DE LA SERPIENTE DE JARRETERA, por David Crews y William R. Garstka
Para sobrevivir en el duro ambiente del Canadá occidental, la serpiente de jarretera ha desarrollado un ciclo fisiológico y conductual de gran precisión.

MORATORIA NUCLEAR, por Randall Forsberg
Las elecciones políticas de Occidente postulan, de una forma bastante generalizada, la necesidad de un plebiscito sobre la moratoria de nuevas armas nucleares.

LA EXPLOTACION DE ESPECIES QUE INTERACTUAN EN UN ECOSISTEMA NATURAL, por John R. Beddington y Robert M. May
Las variaciones observadas en las poblaciones de ballenas y otros animales que se alimentan del krill del océano Austral constituyen un ejemplo de los problemas que plantea aprovechar un recurso biológico sin tener que acabar con las especies.

EL CRECIMIENTO DEL BORDE OCCIDENTAL DE NORTEAMERICA, por David L. Jones, Allan Cox, Peter Coney y Myrl Beck
Durante los últimos 200 millones de años, el continente se ha extendido hacia poniente por colisión reiterada con masas terrestres menores.

LA PARED CELULAR DE LOS HONGOS, por Rafael Sentandreu, José Ruiz-Herrera y M. Victoria Elorza
La investigación de los procesos implicados en su formación ha puesto de manifiesto los mecanismos de síntesis, secreción y ensamblaje de los distintos componentes, cristalinos y amorfos, que le dan estructura.



Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

VERIFICACION DE UNA PROHIBICION ABSOLUTA DE PRUEBAS NUCLEARES

THE GREAT TEST-BAN DEBATE. Herbert F. York en *Scientific American*, vol. 227, n.° 5, págs. 15-23; noviembre, 1972.

NUCLEAR EXPLOSIONS AND EARTHQUAKES: THE PARTED VEIL. Bruce A. Bolt. W. H. Freeman and Company, 1976.

STUDY OF SEISMOLOGICAL EVASION, PART 1: GENERAL DISCUSSION OF VARIOUS EVASION SCHEMES. PART 2: EVALUATION OF EVASION POSSIBILITIES USING NORMAL MICROSEISMIC NOISE. PART 3: EVALUATION OF EROSION POSSIBILITIES USING CODAS OF LARGE EARTHQUAKES. Jack F. Evernden en *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 66, n.° 1, págs. 245-280 (1.ª parte), págs. 281-324 (2.ª parte), febrero, 1976; n.° 2, págs. 549-592 (3.ª parte), abril, 1976.

THE COMPREHENSIVE TEST BAN. Stockholm International Peace Research Institute en *World Armaments and Disarmament: SIPRI Yearbook 1978*. Taylor and Francis Ltd., 1978.

TRIPARTITE REPORT TO THE COMMITTEE ON DISARMAMENT (UNITED NATIONS). En *World Armaments and Disarmament: SIPRI Yearbook 1981*. Taylor and Francis Ltd., 1981.

CALCIO Y TRANSMISION SINAPTICA

MEMBRANE ULTRASTRUCTURE OF THE GIANT SYNAPSE OF THE SQUID *LOLIGO PEALII*. D. W. Pumplin y T. S. Reese en *Neuroscience*, vol. 3, n.° 8, págs. 685-696; agosto, 1978.

PRESYNAPTIC CALCIUM CURRENTS IN SQUID GIANT SYNAPSE. R. Llinás, I. Z. Steinberg y K. Walton en *Biophysical Journal*, vol. 33, págs. 289-321; marzo, 1981.

RELATIONSHIP BETWEEN PRESYNAPTIC CALCIUM CURRENT AND POSTSYNAPTIC POTENTIAL IN SQUID GIANT SYNAPSE. R. Llinás, I. Z. Steinberg y K. Walton en *Biophysical Journal*, vol. 33, págs. 323-351; marzo, 1981.

TRANSMISSION BY PRESYNAPTIC SPIKELIKE DEPOLARIZATION IN THE SQUID GIANT SYNAPSE. R. Llinás, M. Sugimori y S. M. Simon en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, n.° 7, páginas. 2415-2419; abril, 1982.

FULGURACIONES SOLARES

SOLAR FLARES. H. J. Smith y E. V. P. Smith. McMillan Co., 1963.

SOLAR FLARES. Z. Svetska. D. Reidel Publishing Co., 1976.

SOLAR FLARES. Dirigido por P. A. Sturrock. Colorado Associated University Press, 1980.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND NATURAL MAN. Margaret Boden. Basic Books, 1977.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE: AN MIT PERSPECTIVE. Patrick Henry Winston y Richard Henry Brown. The MIT Press, 1979.

MACHINES WHO THINK. Pamela McCorduck. W. H. Freeman and Company, 1979.

THE MIND'S I. Douglas R. Hofstadter y Daniel C. Dennett. Basic Books, 1981.

PERSPECTIVES IN COGNITIVE SCIENCE. Dirigido por Donald A. Norman. Ablex Publishing, 1981.

FLUIDOS MAGNETICOS

FERROHYDRODYNAMICS. Joseph L. Neuringer y Ronald E. Rosensweig en *The Physics of Fluids*, vol. 7, n.° 12, págs. 1927-1937; diciembre, 1964.

FLUID DYNAMICS AND SCIENCE OF MAGNETIC LIQUIDS. Ronald E. Rosensweig en *Advances in Electronics and Electron Physics*, vol. 48, págs. 103-199; 1979.

PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETIC FLUIDS. En *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. Mag-16, n.° 2, páginas 171-415; marzo, 1980.

MACAREOS DE MAREA

THE SEVERN BORE. Fred Rowbotham, David & Charles, Newton Abbot, 1964.

BORES, BREAKERS, WAVES AND WAKES: AN INTRODUCTION TO THE STUDY OF WAVES ON WATER. R. A. R. Tricker. American Elsevier Publishing Co., 1965.

THE SEAS IN MOTION. F. G. Walton Smith. Thomas Y. Crowell Co., 1973.

ASI SE FUNDA UNA COLMENA

THE SOCIAL BEHAVIOR OF BEES: A COMPARATIVE STUDY. Charles D. Michener. Harvard University Press, 1974.

THE NEST OF THE HONEY BEE. T. D. Seeley y R. A. Morse en *Insectes Sociaux*, vol. 23, págs. 455-512; 1976.

ECLIPSES HISTORICOS

GROWTH RHYTHMS AND THE HISTORY OF THE EARTH'S ROTATION INTERDISCIPLINARY WINTER CONFERENCE ON BIOLOGICAL CLOCKS AND CHANGES IN THE EARTH'S ROTATION: GEOPHYSICAL AND ASTRONOMICAL CONSEQUENCES, NEWCASTLE-UPON-TYNE, 1974. Dirigido por G. D. Rosenberg y S. K. Runcorn. John Wiley & Sons, Inc., 1975.

APPLICATIONS OF EARLY ASTRONOMICAL RECORDS. F. Richard Stephenson y David H. Clark. Oxford University Press, 1978.

TIDAL FRICTION AND THE EARTH'S ROTATION. Dirigido por P. Brosche y J. Sündermann. Springer-Verlag, 1978.

THE EARTH'S VARIABLE ROTATION: GEOPHYSICAL CAUSES AND CONSEQUENCES. Kurt Lambeck. Cambridge University Press, 1980.

PROCEEDINGS OF A CONFERENCE ON THE ANCIENT SUN. Dirigido por R. O. Pepin, J. A. Eddy y R. B. Merrill. Pergamon Press, 1980.

SOLAR RADIUS VARIATIONS OVER THE PAST 265 YEARS. Ronald L. Gilliland en *The Astrophysical Journal*, vol. 248, n.° 3, 1.ª parte, págs. 1144-1155; septiembre, 1981.

TEMAS METAMAGICOS

ONE BOOK/FIVE WAYS: THE PUBLISHING PROCEDURES OF FIVE UNIVERSITY PRESSES. Prefacio de Joyce Kachergis e introducción por Chandler Grennis. William Kaufmann, Inc., 1978.

THE CONCEPT OF A META-FONT. Donald E. Knuth en *Visible Language*, vol. 16, n.° 1, págs. 3-27; invierno, 1982.

TALLER Y LABORATORIO

COIN SPINNING ON A TABLE. M. G. Olsson en *American Journal of Physics*, vol. 40, págs. 1543-1545; octubre, 1972.

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1982. Se incorpora asimismo la relación alfabética de las secciones* Juegos matemáticos, Temas metamágicos *y* Taller y laboratorio.

AUTORES

ARTICULOS

JUEGOS MATEMATICOS

Autor: Martin Gardner

TEMAS METAMAGICOS

Autor: Douglas R. Hofstadter

TALLER Y LABORATORIO

Autor: Jearl Walker